

3.3 Luftbilder

Teilprojektleiter:	Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill
Bearbeiter:	Dr.-Ing. Görres Grenzdörffer, Dipl.-Geogr. Torsten Foy
Einrichtung:	Universität Rostock Institut für Geodäsie und Geoinformatik

3.3.1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Aus dem Antrag werden mehrere zentrale Aspekte hervorgehoben und in nachfolgenden Kapiteln im Hinblick auf ihre Bearbeitung und Zielerfüllung diskutiert:

1. Im Rahmen von Precision Agriculture soll die Fernerkundung als ein integraler, operationeller und kosteneffizienter Bestandteil etabliert werden.
2. Das vorhandene luftbildgestützte System ist im Hinblick auf seine Operationalität weiter zu entwickeln.
3. Neue Verfahren und Sensoren sollen erprobt und getestet werden.
4. Durch regelmäßige Befliegungen zu pedologisch und phänologisch günstigen Zeitpunkten soll die räumliche Boden- und Bestandesentwicklung mit einer detaillierten semiautomatischen Bildauswertung in signifikanten Zwischenschritten dokumentiert werden.
5. Im Hinblick auf die unterschiedliche Agrarstruktur und die Vielfältigkeit der Anwendungsmöglichkeiten der Fernerkundung werden regional typische Einsatzmöglichkeiten erarbeitet.
6. Fernerkundungsdaten sind in die *pre agro* Module zu integrieren.

3.3.2 Durchgeführte Maßnahmen-, Forschungsarbeiten

Die vielfältigen Forschungsaktivitäten der vergangenen vier Jahre werden im Folgenden in Entsprechung der ursprünglichen Aufgabenstellung erläutert:

Zu 1.: Um das Anwendungspotenzial und die Limitationen verschiedener fernerkundlicher Sensoren für Precision Agriculture zu ermitteln sind methodische Untersuchungen durchgeführt worden. Dabei schälten sich zwei große Anwendungsbereiche heraus. Erstens die Möglichkeiten der Luftbildfernerkundung als Management- und Kontrollinstrument, insbesondere für ostdeutsche Großbetriebe und zweitens die Nutzung fernerkundlicher Daten zur direkten und indirekten Unterstützung teilflächenspezifischer Applikationen. Bei der Applikationsunterstützung kommt es darauf an, wie die Fernerkundungsdaten und die daraus abgeleiteten Produkte zur Applikationskartenerstellung integriert werden sollen, als räumlich differenzierte Grundlageninformationen zum Boden- und Ertragspotenzial (=Standort(potenzial)-karten) oder als zeitabhängige Informationen zur Bestandesentwicklung, zum Bodenwasserhaushalt und zur Qualität der geleisteten Bewirtschaftungsmaßnahmen (=Zustandskarten).

Der Beitrag der Fernerkundung für statische Applikationen (Aussaat, Grunddüngung ...) liegt vor allem darin, zuverlässige Standortinformationen, wie beispielsweise quantitative Informationen zur Bodenart, zur verfügbaren Feldkapazität oder zum Ertragspotenzial auf der Grundlage multispektraler Informationen zu liefern. Für Online-Verfahren, die in erster Linie den aktuellen Pflanzenzustand oder die Verunkrautungssituation mit einem Sensor bestimmen und bewerten sollen, liefern Fernerkundungssensoren die notwendigen spektralen Informationen. Dazu wurden in den letzten Jahren traktorbasierte Systeme entwickelt, die eine real-time Applikation ermöglichen. Alternativ zu traktorgestützten Sensoren kann die Luftbildfernerkundung ebenfalls aktuelle und großräumige Bestandesinformationen z.B. zur N-Düngung oder für Fragestellungen im Bereich des Pflanzenschutzes liefern.

Zu 2.: Während der Projektlaufzeit ist am Institut für Geodäsie und Geoinformatik für die speziellen Anforderungen des **Precision Farming** ein digitales integriertes flugzeuggetragenes Fernerkundungssystem (PFIFF) entwickelt worden. Neben einer hochauflösenden, photogrammetrisch und radiometrisch kalibrierten Farbdigitalkamera gehören außerdem die GPS-gestützte Bildflugnavigation, ein integriertes System zur automatischen GPS-gestützten Auslösesteuerung und ein Attitude Heading Reference System (AHRS) zum Gesamtsystem. Zur Geokodierung der Bilddaten sind im Laufe des Projekts verschiedene Ansätze untersucht worden, die von einer parametrischen Georeferenzierung bis zur passpunktlosen Aerotriangulation unter Verwendung eines hochgenauen GPS-Empfängers reichen. Bei der Aerotriangulation, die eine subpixelgenaue Georeferenzierung ermöglicht, ist durch redundante Bildinformationen in den Überlappungsbereichen eine Farbhomogenisierung innerhalb der Schläge möglich, um die Probleme der Bidirektionalen Reflexionseigenschaften von natürlichen Oberflächen zu minimieren. Damit ist ein System entwickelt worden, das in der Lage ist innerhalb weniger Tage für ein Gebiet an beliebiger Stelle ein hochgenaues Orthophotomosaik zu generieren, das sowohl als Grundlage für Managementaufgaben als auch zur Applikationsunterstützung gleichermaßen geeignet ist.

Zu 3.: Im Bereich der Satellitenfernerkundung sind aufgrund der zeitlichen Auflösung von 16 Tagen und der Kosten für eine Zeitserie als weitere zu untersuchende Sensoren vornehmlich Landsat ETM Daten in Form einer Zeitreihe von Februar – August 2001 ausgewertet worden. Darüber hinaus sind drei Landsat TM Miniszenen (1995, 1997 und 2000) der Region Thumbby mit dem Ziel der Erkennung von stabilen Ertragsmustern während der Seneszenzphase analysiert worden. Gegenüber flugzeuggetragenen Aufnahmen liegen die grundsätzlichen Vorteile von Satellitenbildern vor allem in der größeren räumlichen Abdeckung sowie in den spektralen Eigenschaften, die bei einer entsprechenden atmosphärischen Korrektur die Ableitung quantitativer Parameter ermöglichen. Nachteilig erwies sich die zu geringe zeitliche Wiederholrate der Satellitensensoren und die in unseren Breiten häufig auftretenden Wolken, die dazu führten, dass zu den gewünschten phänologischen Terminen teilweise keine Aufnahmen zur Verfügung standen.

Zur Untersuchung höchstauflösender digitaler flugzeuggetragener Systeme konnte im Frühjahr 2002 ein Bildflug mit der HRSC-AX-Kamera der DLR in Kassow realisiert

werden. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Prozessierung der Daten seitens der DLR kann noch keine abschließende Bewertung über die Eignungsfähigkeit der Daten abgegeben werden. Ein Bildflug mit der Digital Metric Camera (DMC) von ZI-Imaging war am 24.09.02 geplant, wurde aber aufgrund der Witterungsverhältnisse auf Ende Oktober verschoben und kann deshalb im Endbericht nicht mehr berücksichtigt werden.

Weiterhin ist das Untersuchungsspektrum um traktorbasierte Sensorsysteme wie dem Hydro-N-Sensor erweitert worden, der im Jahre 2001 und teilweise 2002 im so genannten Spektralmodus zur Verfügung stand und mit den Daten der anderen Sensorsysteme intensiv verglichen werden konnte.

- Zu 4.: Fernerkundliche Daten verschiedener Sensoren sind unterschiedlich gut geeignet, um die raum-zeitliche Bestandesentwicklung zu untersuchen. Anhand eines umfangreichen Sensorvergleichs von terrestrischen, flugzeuggetragenen und satellitengetragenen Sensoren 2001 konnten die Vor- und Nachteile der verschiedenen Systeme in Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten herausgearbeitet werden. Die Dynamik der Bestandesentwicklung konnte aus den Luftbildern anhand visueller Techniken, spezieller Indizes sowie teilautomatisierten Klassifikationsverfahren für mehrere Schläge und Jahre untersucht werden. Durch mehrfache Überflurten mit dem Hydro-N-Sensor konnte der Seneszenzverlauf genau erfasst und im Hinblick auf die zugrundeliegenden pflanzenphysiologischen Veränderungen untersucht werden.
- Zu 5.: Während der gesamten Projektlaufzeit sind die *pre agro* Betriebe, mit der Ausnahme der Standorte in Bayern, regelmäßig befliegen worden. Der *pre agro*-Betrieb Kassow ist aufgrund seiner räumlichen Nähe und paralleler Referenzuntersuchungen noch häufiger befliegen worden. Anhand der über 3.500 Aufnahmen konnten phänologisch günstige und weniger günstige Aufnahmezeiträume für die verschiedenen Untersuchungsgebiete ermittelt werden. Die pedologische Aussagekraft der Daten ist von den TP's II-1a und II-1b im Rahmen der Hofbodenkarte und der Reliefanalyse intensiv untersucht worden.
- Zu 6.: Eine direkte Integration der fernerkundlichen Daten in ein *pre agro*-Modul als ein Eingangsparameter erfolgte nicht, da FE-Informationen seitens der Modulersteller nicht dafür vorgesehen waren. Dies ist z.B. auf nicht ausreichende Erfahrungen mit den Fernerkundungsdaten, das Fehlen einfacher fernerkundlicher Produkte etc. zurückzuführen. Dennoch sind die Daten in vielfältiger Weise für die Modulerstellung als qualitative Information notwendig gewesen. Z.B. als Validierungsinformation und Dokumentationsmedium bei der Kontrolle von (einheitlichen) und teilflächenspezifischen Applikationen sowie als zusätzliche Datenquelle zur Analyse unvorhergesehener Ereignisse (Vernässung, Verunkrautung, Lagergetreide, ...).

3.3.3 Zielerfüllung/-erreichung

Die in der Einleitung skizzierten Aufgabenstellungen konnten sehr erfolgreich abgearbeitet werden. Außerdem konnten zum Zeitpunkt der Antragstellung noch nicht bekannte Fragestellungen zusätzlich bearbeitet werden, wie z.B. die Untersuchung terrestrischer Sensoren.

Eine direkte Integration der fernerkundlichen Daten als ein Standarddatum in die verschiedenen von *pre agro* entwickelten Module ist nicht erfolgt, was auf die dargestellten Ursachen zurückzuführen ist.

3.3.4 Übersicht und Zusammenfassung

Ausgehend von den methodischen Arbeiten zum Einsatzpotenzial der Fernerkundung im Allgemeinen und des am Institut für Geodäsie und Geoinformatik entwickelten digitalen flugzeuggestützten Fernerkundungssystems PFIFF im Besonderen wird die Dokumentation und die Analyse der raum-zeitlichen Entwicklung der Pflanzenbestände im nachfolgenden behandelt. Dabei wird auf folgende Punkte schwerpunktmäßig eingegangen:

- Anforderungen und Limitationen von FE-Systemen für verschiedene Precision Agriculture -Anwendungen
 - Schwachstellenanalyse und monetärer Nutzen von FE-Daten für Precision Agriculture
- PFIFF – Komponenten, Kalibrierung und Ergebnisse
- Raum-zeitliche Bestandesentwicklung
 - Auswertungen zur Bestandesentwicklung (Visuelle Interpretation, spektrale Indizes und Klassifikation, Mikroheterogenität und Bonituren)
 - Seneszensanalyse (multitemporale Satellitenbilddauswertung, Hydro-N-Sensor im Spektralmodus)
 - Sensorvergleich – vom Traktor bis zum Satellit

Bei der Darstellung der vielfältigen Ergebnisse wird versucht, diese anhand weniger Schläge zu demonstrieren. Die Beispiele konzentrieren sich deshalb auf den Projektbetrieb Kassow, abgesehen von der multitemporalen Satellitenbilddauswertung, die in Thumby durchgeführt wurde und dem Sensorvergleich, der anhand eines Schläges des Projektbetriebs Wimex vorgestellt wird.

3.3.5 Methoden/Vorgehensweise und Ergebnisse

3.3.5.1 Anforderungen an Fernerkundungssysteme für Precision Agriculture-Anwendungen

Im Hinblick auf den Aufnahmezeitraum, den Turn-around-Zeitraum, die Bodenauflösung, die Daten(vor)verarbeitung und die Zusatzinformationen unterscheiden sich die Anforderungen an ein Fernerkundungssystem für langfristige Standortinformationen, aktuelle Zustandsinformationen oder Managementinformationen deutlich. Der nachfolgende Vergleich soll dies verdeutlichen:

Langfristige Standortinformationen: Als Sensorplattformen kommen hierfür hochauflösende Satellitensysteme sowie flugzeuggestützte Multi- bzw. Hyperspektralscanner in Frage. Bodenauflösungen von 10 - 30 m sind völlig ausreichend, denn für Potenzialberechnungen sind flächendeckende Aussagen wichtig und die durch eine zu hohe Bodenauflösung verursachte Mikrovarianz eher irritierend. Die Aufnahmezeitspanne orientiert sich an der Phänologie der Pflanzen bzw. an

den Bodenwasserverhältnissen und reicht von einigen Tagen bis mehreren Wochen. Aufgrund der Witterungs- und Bestandeseinflüsse sind zuverlässige Standortkarten nur durch einen mehrjährigen multitemporalen Ansatz zu erhalten. Grundlage dafür ist ein aufwändiges Preprocessing inkl. Atmosphärenkorrektur radiometrisch exakt kalibrierter Sensoren und für multispektrale Analysen ausreichend genaue Ground Truth-Daten sowie weitere Zusatzinformationen aus einem GIS. Im Gegensatz zu den Zustandsinformationen ist die Turn-around-Zeit, d.h. der Zeitraum von der Aufnahme bis zur Übergabe an den Landwirt bei Standortkarten weniger zeitkritisch.

Kurzfristige Zustandsinformationen: Zur Bestandeserfassung hat eine flexible hochauflösende Aufnahme zu phänologisch wichtigen Terminen und eine schnelle, d.h. automatisierte Prozessierung der Bilddaten oberste Priorität. Die Flexibilität ist am besten durch digitale flugzeuggestützte Aufnahmesysteme gewährleistet. Die notwendige Bodenauflösung zur Unterstützung der Bestandesführung liegt bei 0.5 - 5 m in Abhängigkeit des zu erfassenden Parameters und der Arbeitsbreite/Reaktionszeit der eingesetzten Maschinen. Für quantitative Analysen einzelner Pflanzenparameter und multitemporale Vergleiche innerhalb einer Vegetationsperiode besteht das Problem darin, eine einfache und zeitnahe Konvertierung von gemessenen Grauwerten in zeitlich vergleichbare und geometrisch korrekte Reflexionswerte zu realisieren. Voraussetzung ist ein radiometrisch kalibrierter Multispektral- oder Hyperspektralsensor, eine Atmosphärenkorrektur, eine Blickwinkelkorrektur (BDRF) sowie eine effiziente Geokodierung. Bei einfacheren Video- oder Digitalkameras ist zusätzlich der Helligkeitsrandabfall und die Mosaikierung im Rahmen der Vorverarbeitung zu berücksichtigen. Während die Geokodierung mit entsprechendem Aufwand durch den Einbau gekoppelter GPS/INS in einer kurzen Zeitspanne realisierbar ist, ist die radiometrische Vorverarbeitung auch im Hinblick auf die teilweise gewaltigen Datenmengen zur Zeit noch nicht innerhalb weniger Tage realisierbar und noch Gegenstand intensiver Forschung, vgl. z.B. Moran et al., 1996. Für qualitative Aussagen oder einzelschlagweise Aufnahmen und Auswertungen hingegen sind low-cost-Systeme in kleinen Sportflugzeugen ausreichend. Zur Applikationsunterstützung ist eine Segmentierung des Bildinhaltes in einige Klassen notwendig. Die Klassifizierung erfolgt entweder auf der Grundlage visueller Interpretation oder durch die Verwendung einfacher Vegetationsindizes. Die für qualitative und quantitative Analysen notwendige Ground Truth-Informationen sind bei nicht kalibrierten low-cost-Sensoren schlagspezifisch zu erheben, da eine Übertragbarkeit auf benachbarte Schläge nicht gewährleistet ist. Bei radiometrisch kalibrierten Sensoren ist eine regionale Übertragbarkeit von Ground Truth-Informationen hingegen möglich.

Die Aufnahme- und Auswertzeiträume für die aktuelle Bestandesführung müssen sich an der Maßnahmenabfolge für einzelne Fruchtarten orientieren, siehe Abb. 3.3-1. Der zeitliche Vorlauf für die Aufnahmen hängt von den phänologischen Entwicklungsstadien und der geplanten Maßnahme ab und reicht von einem Tag für eine Fungizidapplikation bis ca. zwei Wochen für eine N-Düngungsmaßnahme. Insgesamt konzentriert sich der Bedarf an aktuellen Bestandesinformationen auf wenige Monate, wie Abb. 3.3-1 für Winterweizen verdeutlicht.

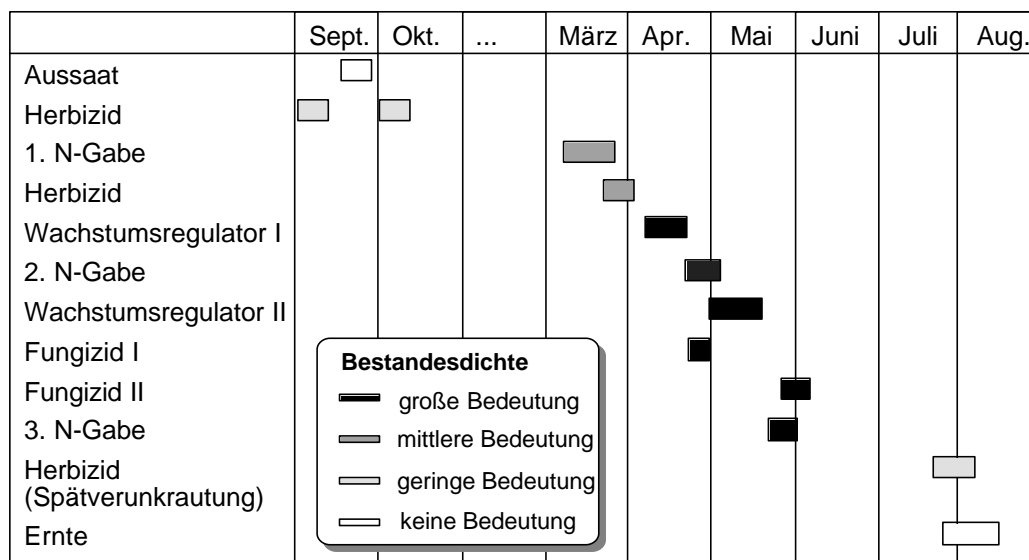


Abb. 3.3-1: Bedeutung der Bestandesdichte / Biomasse für teilflächenspezifische Applikationen am Beispiel Winterweizen (Nordostdeutschland)

Für die Applikationsunterstützung mit Standort- und Zustandsinformationen sind aufgrund der Turn-around-Zeiträume und der Erfassungs- und Regelungsgröße der eingesetzten Landmaschinen unterschiedliche Fernerkundungssensoren geeignet, siehe Abb. 3.3-2.

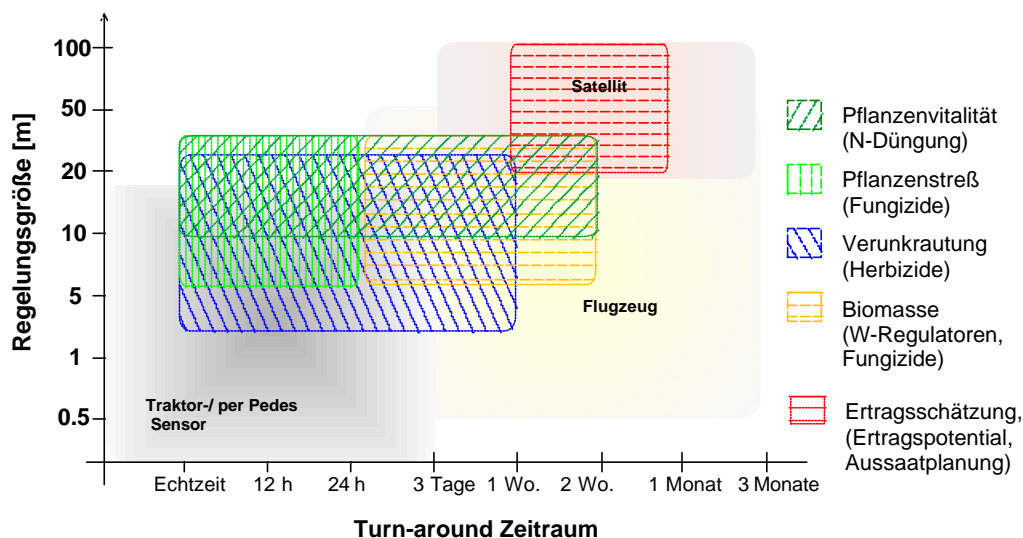


Abb. 3.3-2: Eignung verschiedener Sensorplattformen für verschiedene Parameter / Maßnahmen in Abhängigkeit der Regelungsgrößen und Turn-around Zeiträume

Managementinformationen: Zur Unterstützung der vielfältigen Managementaufgaben ist ein Sensorsystem mit flexiblen Aufnahmekonfigurationen notwendig, wie es in idealer Weise durch digitale Sensoren in kleinen Sportflugzeugen gegeben ist. Für rein visuelle Auswertungen sind Echtfarbenaufnahmen zur Interpretation besonders geeignet. Zur Orientierung auf dem Feld müssen Fahrgassen und weitere wichtige topographische Elemente erkennbar sein. Das bedeutet eine Bodenauflösung von ≤ 1 m. Zur Dokumentation bestimmter phänologischer Zustände oder sonstiger Ereignisse (z.B. Hagel, Wildschäden, Erosion) ist eine kurzfristige Wahl des Aufnah-

mezeitpunkts (1 - 14 Tage) inklusive einem kurzen Turn-around-Zeitraum anzustreben. Der Vorverarbeitungsaufwand ist im Gegensatz zur direkten Applikationsunterstützung relativ gering, denn für einige Anwendungsbereiche kann in Kombination von nordorientierten Aufnahmen und einer Bildmittenübersicht auf eine Geokodierung verzichtet werden. Dies gilt jedoch nicht, wenn die Aufnahmen z.B. zur Flächenvermessung und zur visuellen Überlagerung im GIS mit anderen Informationsebenen eingesetzt werden sollen.

3.3.5.2 Wolken – ein unterschiedlich limitierender Faktor optischer flugzeug- und satellitengestützter Fernerkundung

Das größte Handikap der optischen Fernerkundung in unseren Breiten sind die unsicheren Witterungsverhältnisse, die nur an einigen Tagen im Jahr eine klare Sicht aus der Vogelperspektive zulassen. Das trifft auf Satellitendaten im Besonderen zu, denn während Flugzeugdaten teilweise auch unter hoher Cirrus- und Altostratusbewölkung aufgezeichnet werden können, sind Satelliten auf absolute Wolkenfreiheit angewiesen. Das bedeutet, dass für eine operationelle Auswertung von flugzeug- und satellitenbasierten Aufnahmen zur Erstellung von Zustands- und Standortkarten im Vorfeld die wahrscheinliche Verfügbarkeit zu bestimmten pflanzenbaulich relevanten Zeiträumen geklärt sein müssen. Außerdem muss für flugzeugbasierte Aufnahmen die Anzahl der potentiellen Flugstunden untersucht werden. Zur Klärung dieser Fragestellungen ist einerseits der jahreszeitliche Verlauf der Sonnendeklination für Rostock berechnet worden. Andererseits wurden von den Wetterstationen Rostock-Warnemünde und Neubrandenburg verschiedene Informationen zu Sonnenstunden und Bewölkung für die Jahre 1997 und 1998 ausgewertet. Während 1997 ein überdurchschnittlich warmes, sonniges und niederschlagsarmes Jahr war, ist 1998 die Witterung eher feucht und wolkenreich gewesen. Aus diesen beiden Jahren ist sicherlich keine statistisch abgesicherte langjährige Aussage zu treffen. Das ist auch nicht notwendig, da die zurückliegenden Werte für das aktuelle Tageswetter keine statistische Signifikanz aufweisen. Vielmehr soll mit diesem Datensatz die Schwankungsbreite zwischen zwei Jahren verdeutlicht und der Unterschied in der Verfügbarkeit von flugzeug- und satellitenbasierter Fernerkundungsdaten beispielhaft herausgearbeitet werden. Für die Untersuchung der Eignung flugzeuggestützter Fernerkundung zur Erstellung aktueller Zustandskarten ist eine Aufschlüsselung der Bildflugmöglichkeiten anhand der phänologischen Entwicklung notwendig, siehe Tabelle 3.3-1 und Tabelle 3.3-2 für die Frühjahrsentwicklung von Winterweizen und Winterraps.

Tab. 3.3-1: Potentielle Flugtage und -stunden zu verschiedenen phänologischen Entwicklungsstadien, Winterweizen (Datengrundlage: DWD und LFA-MV)

	Winterweizen 1997		Winterweizen 1998	
	Flugtage	Flugstunden	Flugtage	Flugstunden
Bestockung (EC 20 - 29)	11	66	7	44
Schossen (EC 30 - 49)	13	77	11	94
Ährenschieben (EC 51 - 59)	0	0	1	5
Blüte u. Fruchtbildung (EC 60 - 79)	2	9	2	12
Milch - Teigreife (EC 80 - 85)	4	19	2	11
Gelbreife - Ernte (EC 87 - 92)	1	3	2	8
Summe	31	174	25	174

Während der langen Bestockungs- und Schossphase des Weizens sind in jedem Jahr Aufnahmen möglich. Die für die Ertragsbildung wichtige Phase des Ährenschiebens ist nur von kurzer Dauer und kann nicht in jedem Jahr bildlich dokumentiert werden. Der Zeitraum bis zur Gelbreife ist wieder ausreichend lang für eine gezielte Aufnahme. Anders sieht es für den Abreifezeitraum aus, der sich je nach Witterungsverlauf über ein bis drei Wochen hinzieht. Trotz sommerlichem Wetter sind in den beiden untersuchten Jahren nur wenige Aufnahmen möglich gewesen.

Tab. 3.3-2: Potentielle Flugtage und -stunden zu verschiedenen phänologischen Entwicklungsstadien, Winterraps (Datengrundlage: DWD und LFA-MV)

	Winterraps 1997		Winterraps 1998	
	Flugtage	Flugstunden	Flugtage	Flugstunden
Blattentwicklung (bis EC 19)	7	40	5	34
Schossen (EC 30 - 39)	1	5	0	0
Entwicklung Blütenanlage (EC 51 - 59)	3	21	2	10
Blüte (EC 60 - 69)	5	32	10	89
Fruchtbildung (EC 70 - 79)	8	46	1	5
Reife (EC 80 - 85)	4	21	3	17
Abreife - Ernte (EC 87 - 92)	2	8	1	6
Summe	30	173	22	161

Der Raps ist während seiner vegetativen Entwicklung bis zur Blüte mit Sicherheit durch eine Aufnahme erfassbar. Das gleiche gilt für die ca. einmonatige Blüte, auch wenn nicht immer die interessante An- oder Abblühphase abgebildet werden kann. Die Fruchtbildungs- und Reifephase erstreckt sich ebenfalls über einen Monat und kann damit sicher registriert werden. Der Abreifeprozess kann, ähnlich wie beim Weizen, innerhalb weniger Tage ablaufen, deshalb ist eine Aufnahme immer mit einer gewissen Unsicherheit verbunden.

3.3.5.3 **Ökonomische Potenziale der Fernerkundung für Precision Agriculture**

Die für den Landwirt entscheidenden Fragen „Was bringt mir die Fernerkundung?“ und „Wie kann ich mit den Aufnahmen und deren Auswertungen Geld verdienen?“ sind nicht einfach und verallgemeinerbar zu beantworten. Dennoch soll nachfolgend ein Versuch unternommen werden, um einerseits das Potenzial einer durch Fernerkundung unterstützten Boden- und Bestandesführung aufzuzeigen und zum anderen anhand einiger Beispiele auch durch eine monetäre Bewertung die Effizienz der Fernerkundung zu demonstrieren. Der monetäre Nutzen einer Aufnahme für den Landwirt lässt sich in drei Kategorien unterteilen:

1. *Einmalnutzen durch die Beobachtung einmaliger oder permanenter Erscheinungen:* Die vielfältigen Möglichkeiten sind stark vom jeweiligen Aufnahmezeitpunkt, der Intensität des Effekts und der Erfahrung des Interpreten abhängig. Der finanzielle Nutzen schwankt von Bild zu Bild und ist schwer in einer durchschnittlichen Angabe je Hektar zu fassen. Das bedeutet nicht, dass eine Bewertung des finanziellen Nutzens nicht anhand einzelner Beispiele möglich ist. Permanente Erscheinungen sind z.B. ehemalige Wege oder Mietenplätze, die unabhängig vom Aufnahmezeitpunkt auf den Bildern sichtbar sind. Die ungefähre Lage ist den Landwirten in der Regel bekannt, allerdings überrascht z.B. die Persistenz alter Wege und ihre Auswirkung auf die Bestandesentwicklung oftmals den Praktiker. Die Beobachtung offensichtlich permanenter Effekte ist weniger vom Aufnahmezeitpunkt und der Erfahrung des Interpreten abhängig. Hinsichtlich der Bewertung des finanziellen Nutzens gelten die oben genannten Aussagen.
2. *Nutzen durch teilflächenspezifische Informationen zur Boden- und Bestandesheterogenität für Precision-Agriculture-Applikationen:* Im Vordergrund einer Maßnahmenunterstützung steht die Kartierung der aktuellen Heterogenität des Bodens bzw. des Bestandes. Da mit einem Luft- bzw. Satellitenbild nur relative Informationen erfasst werden, muss eine „Übersetzung“ der kartierten Grauwerte bzw. Farbwerte in quantitative Werte auf der Grundlage eines Interpretationsschlüssels bzw. eines mathematisch/statistischen Modells erfolgen. Voraussetzung für eine gezielte Applikationsunterstützung ist je nach der geplanten Maßnahme eine aktuelle Aufnahme, auf der die gewünschten Informationen (z.B. Bestandesdichte, Bodenfeuchte) auch erkennbar sind. Der finanzielle Nutzen ist von mehreren Faktoren abhängig. Während eine große Heterogenität in der Fläche und die Verwendung von teuren Mitteln eine intensive differenzierte Auswertung rechtfertigt, ist bei homogenen Flächen und preiswerten Mitteln eine gröbere Auswertung notwendig.
3. *Langfristiger Nutzen zur Unterstützung strategischer Ziele:* Erst durch eine kombinierte Auswertung mehrerer Aufnahmen und anderer Informationen über eine oder besser noch mehrere Vegetationsperioden können zuverlässige Aussagen zu persistenten Ertragspotenzialen gemacht werden. Darüber hinaus liefern Fernerkundungsaufnahmen notwendige raumbezogene Informationen zur Bestandesentwicklung, die zusammen mit der Ertragskartierung eindeutige Aussagen zu Ursache und Wirkung von Ertragsunterschieden zulassen. So lassen sich beispielsweise eindeutige und wahrscheinlich wiederkehrende Ertragsdepressionen aufgrund von Frühjahrsvernässungen von Sondereinflüssen z.B. durch Bewirtschaftungsfehler oder Wildfraß trennen.

Auf die Frage, warum sich eigentlich in Deutschland bzw. Europa kaum ein flächendeckender Dienstleistungsmarkt für teilflächenspezifische Fernerkundungsdienstleistungen trotz der ökonomischen Potenziale etabliert hat, gibt es viele Antworten, die u.a. JRC, CEO (1998) sowie Gabriel und Havaresch (1999) zusammengefasst haben:

- Die Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten ist aufgrund der Wetterabhängigkeit optischer Systeme limitiert, was insbesondere für heutige Satellitensysteme mit langen Revisitraten gilt. Bei einer kombinierten Auswertung mehrerer Sensoren ist zu beachten, dass diese immer mit erhöhtem Aufwand bei der radiometrischen Prozessierung verbunden ist, da streng genommen nur absolute Strahldichten miteinander verglichen werden dürfen und nicht die Ergebnisse (z.B. NDVI) der verschiedenen Sensoren. Außerdem ist die geometrische und radiometrische Auflösung hochauflösender Satelliten, wie z.B. Landsat TM, LISS III und Spot XS unterschiedlich, was zu einem zusätzlichen Aufwand und ggf. zu Genauigkeitseinbußen bei einer kombinierten Auswertung führt.
- Die Einsatzmöglichkeiten von Fernerkundung und damit die Wertschöpfung für den Landwirt steigt mit den Umsetzungsmöglichkeiten durch teilflächenspezifische Maßnahmen. Viele aktive Precision Agriculture-Komponenten, die eine gezielte Applikation z.B. von Saat, Dünger und PSM ermöglichen sollen, stehen erst seit kurzem zur Verfügung und werden laufend weiterentwickelt, um den Anforderungen in vollem Umfang gerecht zu werden. Außerdem muss der Landwirtschaftsbetrieb oder Lohnunternehmer über ein GIS verfügen, das in der Lage ist, die Fernerkundungsdaten darzustellen, zu verarbeiten und in Applikationskarten zu übersetzen. Da Precision Agriculture in der Landwirtschaft noch nicht flächendeckend eingeführt ist, stehen flächendeckende Fernerkundungsdienstleistungen ebenfalls erst am Anfang.
- Für jede (teil)flächenbezogene Interpretation und Auswertung fernerkundlicher Daten, die aus relativen Grau- bzw. Indexwerten bestehen, ist (teil)flächenspezifische Ground Truth Information notwendig. Hier ist in erster Linie der Landwirt mit seinem standörtlichen Detailwissen gefragt. Allerdings setzt gerade die Analyse von Satellitendaten mit Spektralbereichen, die sich außerhalb des sichtbaren Lichts befinden, entsprechende Qualifikationen voraus, die ein Landwirt als Endkunde in der Regel nicht mitbringt. Das führt dazu, dass der Landwirt diese Informationen nur schwer interpretieren und in den Entscheidungsprozess integrieren kann.
- Mit der Integration fernerkundlicher Daten als Basis- bzw. Bestandesinformation in Modelle für teilflächenspezifische Maßnahmen hat sich die Wissenschaft erst in den letzten Jahren beschäftigt, z.B. Steven und Millar, 1997. Das bedeutet für die Praxis, dass immer noch ein großes Wissensdefizit besteht, wie die Daten und ihre abgeleiteten Produkte (z.B. der NDVI) einfach und sicher in Modelle einzubinden sind, die z.B. Aussaatstärken, Düngermengen berechnen.
- Bei der Entwicklung leistungsstarker Dienstleistungen sind neben der Überwindung einer Vielzahl technischer Probleme auch organisatorische Schwierigkeiten zu überwinden. Das betrifft z.B. ein rasches und flexibles Bildflugmanagement, das eine optimale Ausnützung der Sonnenstunden ermöglicht. Ebenso ist die zeitkritische Verarbeitung, Auslieferung und Archivierung der Bilddaten zu bedenken, denn für viele Fragestellungen ist eine kurze Lie-

ferzeit sehr wichtig. Allerdings darf dies die Produktpreise nicht unnötig in die Höhe treiben. Ein funktionierendes Zusammenspiel zwischen den bestehenden landwirtschaftlichen Beratungs- und Untersuchungsdienstleistungen sowie dem Landwirt ist für die gezielte Auswertung der Bilddaten aufzubauen, denn die Fernerkundung liefert nur einen wichtigen Baustein im Rahmen des Precision Agriculture.

Nicht zuletzt sind die Landwirte und ihre Berater durch vielfältige Informations- und Fortbildungsaktivitäten über die Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung zu informieren. Hier bestehen viele Defizite, vor allem was den Informationsgehalt, die Verfügbarkeit und die Preise anbelangt.

Trotz der oben genannten Schwierigkeiten bieten seit kurzem mehrere Firmen in Europa und den USA satellitengestützte (Landsat TM, SPOT, IKONOS) Fernerkundungsdienstleistungen für Precision Agriculture an. Die Bilddaten sowie daraus abgeleitete Indices und Veränderungskarten werden ohne zusätzliche Ground Truth Daten beim Hersteller bzw. Dienstleister verarbeitet. Das bedeutet, der Landwirt als Endkunde erhält ein oder mehrere Bilder mit Relativinformationen, die für eine irgend geartete Anwendung dienen sollen und entsprechend interpretiert werden müssen.

3.3.5.4 PFIFF

Ausgehend von den einleitend definierten Anforderungen ist am Institut für Geodäsie und Geoinformatik für **Precision Farming** ein digitales integriertes flugzeuggetragenes Fernerkundungssystem (PFIFF) konzipiert, entwickelt, kalibriert und getestet worden, das den Landwirt als Management- und Controllinginstrument in der Boden- und Bestandesführung unterstützen und für teilflächenspezifische Applikationen notwendige Bestandesinformationen liefern kann. Die Gewährleistung der notwendigen Flexibilität, Aktualität und Zyklizität ist in erster Linie durch eine schnelle Bildflugplanung und ausgeklügelte Logistik mit dem Flugbetrieb sowie durch einen effizienten Workflow zur Prozessierung der Daten einschließlich der Metadaten und Archivierung im Hause, zu erreichen. Mit der Erfassung der genäherten Position und Lage der Projektionszentren sollte bei der Geokodierung der Aufnahmen ein deutlicher Effizienzgewinn im Rahmen einer automatischen Aerotriangulation ermöglicht werden. Die dafür notwendige Genauigkeit liegt in Abhängigkeit des Bildmaßstabs bei 3 - 8 m in x,y,z, sowie $0,5^\circ$ - $1,0^\circ$ in ω, ϕ, κ . Neben der Kamera gehören außerdem die GPS-gestützte Bildflugnavigation, ein integriertes System zur automatischen GPS-gestützten Auslösesteuerung und der genäherten Erfassung der Parameter der äußeren Orientierung zum Gesamtsystem, das in Abb. 3.3-3 schematisch dargestellt und nachfolgend mit seinen Vor- und Nachteilen im einzelnen kurz erläutert wird.

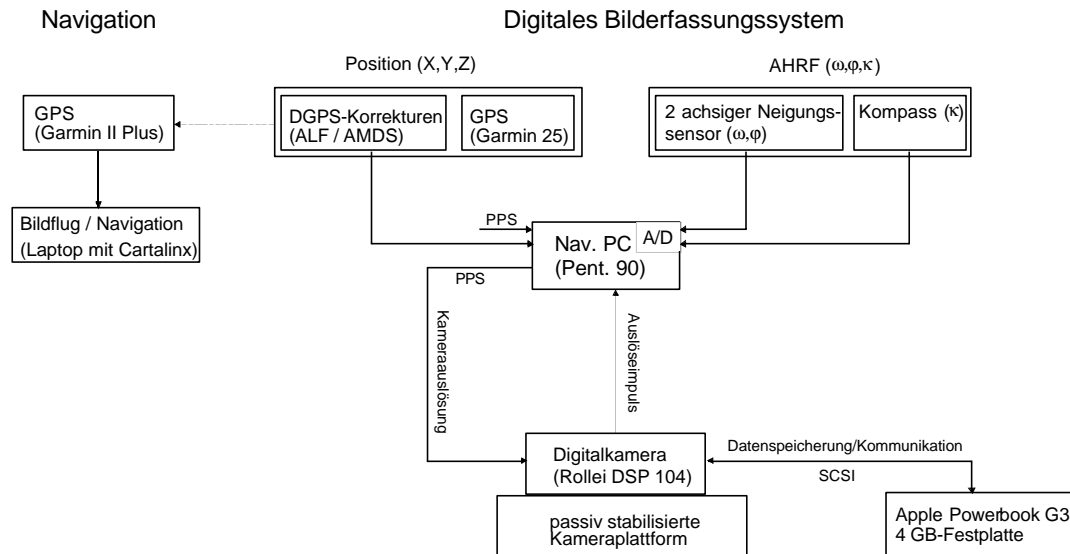


Abb. 3.3-3: Aufbau und Komponenten des digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystems PFIFF

Bei der Frage nach einem geeigneten Sensor, der sowohl eine hohe Auflösung bietet als auch über multispektrale Eigenschaften verfügt und als Teilmesskamera photogrammetrischen Ansprüchen genügen soll, ist zwischen den Vor- und Nachteilen von (multispektralen) Zeilenscannern und Full-Frame-Sensoren, wie z.B. (Farb/NIR) Digital- oder Videokameras abzuwägen. Aufgrund der einfacheren Geometrie kommt für ein digitales low-cost System nur ein Flächensensor in Frage, der in einer handelsüblichen Kamera eingebaut sein muss. Nach reiflicher Überlegung fiel die Wahl der Kamera auf einen Rollei DSP 104 Farbdigitalsensor mit einer Auflösung von 2010×2018 Pixel (weitere Details siehe Tab. 3.3-3). Das Digitalrückteil verfügt damit über eine vergleichsweise hohe geometrische und radiometrische Auflösung und ist mit der bereits bestehenden Kameraausrüstung voll kompatibel. Im Sommer 2002 konnte durch Haushaltsmittel die bisherige Kamera durch eine noch leistungsfähigere ersetzt werden. Die neue Digitalkamera Rollei db23 ist ein Nachfolger der DSP 104 und bietet eine Vielzahl von Vorteilen, die ebenfalls in der Tab. 3.3-3 dargestellt sind.

Bei einer Digitalkamera, die für den Bildflug verwendet werden soll, ist nicht nur die Größe des CCD-Chips von Bedeutung, sondern auch viele andere Eigenschaften der Kamera, wie die Bildfolgezeit, der Massenspeicher, eine Previewoption, die mechanische Stabilität, die zeitliche Exzentrizität, die Zuverlässigkeit und die radiometrischen Eigenschaften müssen berücksichtigt und gemessen werden, um aus einer handelsüblichen Kamera eine Teilmesskammer für den Bildflug machen zu können.

Durch eine Testfeldkalibrierung sind die Parameter der Inneren Orientierung der verwendeten Digitalkamera Rollei DSP 104 bestimmt worden. Dabei zeigte sich, dass der Bildhauptpunkt zwischen den Messungen aufgrund der geringen mechanischen Stabilität deutlich variiert, während die Radialverzerrung und die Kammerkonstante vergleichsweise konstant bleiben. Die Kamera verfügt über radiometrische Eigenschaften, die einer photographischen Aufnahme überlegen sind, wie die Untersuchungen zur Linearität, den spektralen Charakteristika der RGB-Bandfilter und dem Signal-Rausch-Verhältnis ergeben haben.

Tab. 3.3-3: Übersicht über technische Parameter der Rollei DSP 104 und der Rollei db23

	Rollei DSP 104	Rollei db23
Kameratyp	Rolleiflex 6008 mit abnehmbarem Digitalrückteil	Rolleiflex 6008 mit fest montiertem Digitalrückteil
Auflösung	2.010 * 2.018 Pixel	3.056 * 2.032 Pixel
Pixelgröße	15 µm * 15 µm	12 µm * 12 µm
Sensorgroße	30.15 mm* 30.27 mm	36.9 mm * 24.6 mm
Farberfassung	Mosaikfilter auf Chip aufgedampft	Mosaikfilter auf Chip aufgedampft
Farbtiefe pro Kanal	12 Bit	12 Bit
Dateigröße (8 Bit-tif)	11,6 MB	18 MB
Minimale Bildfolgezeit	ca. 7 Sek. (RapidShot Modus)	ca. 1,8 Sek.
Gewicht (inkl. Kamera)	ca. 2.200 g	ca. 1.500 g
Rechneranbindung	SCSI II, Apple Powerbook G3	Firewire, Notebook
Software	Rollei DSP 104 Vers. 2.1.5	Phase One 2.7

Bei der Entwicklung eines low-cost-Fernerkundungssystems, das auch photogrammetrischen Ansprüchen genügt, sind verschiedene Rahmenbedingungen im Zusammenhang mit dem Digitalsensor vorab zu klären, welche Flughöhen und Fluggeschwindigkeiten bei welcher Längsüberlappung zulässig sind, ob es zu Unschärfen durch Bildwanderung kommt und inwieweit eine Stabilisierung der Kamera notwendig ist, um genäherte Senkrechtaufnahmen zu erhalten.

Während die räumliche Exzentrizität zwischen dem Projektionszentrum und der GPS-Antenne für den low-cost-Fall einfach durch die Montage der GPS-Antenne direkt oberhalb der Kamera auf dem Flugzeugdach zu lösen ist, erfordert die Berücksichtigung der zeitlichen Exzentrizität einen wesentlich größeren technischen Aufwand bei einer Digitalkamera gegenüber einer analogen Kamera. Die Verzögerung zwischen Auslöseimpuls und Belichtung ist bei der verwendeten Digitalkamera sehr variabel und schwankt bis zu 1.200 ms. Aus diesem Grund wird der exakte Belichtungsimpuls vom Blitzschuh abgegriffen und im Navigationsrechner mit einer zeitlichen Auflösung von 7,2 ms der Auslösesekunde zugeordnet.

3.3.5.4.1 Geometrische und radiometrische Sensorkalibrierung für den Bildflug

Eine allgemein in der Photogrammetrie zu beobachtende Tendenz geht dahin, immer einfachere, standardisierte Komponenten zu verwenden, die über eine sorgfältige Kalibrierung letztendlich eine ähnlich hohe Messgenauigkeit ermöglichen, wie teure high end Produkte. Bei der Untersuchung der Bildqualität digitaler CCD-Aufnahmesysteme sind, gegenüber einem analogen Meßsystem, einige zusätzliche Parameter zu beachten, die mit der elektronischen Bilderzeugung verbunden sind. In den nachfolgenden Tabellen sind einige wichtige geometrische und radiometrische Parameter aufgeführt, die anhand praktischer Tests untersucht wurden. Die **fett** markierten sollen im Rahmen dieses Endberichts im folgenden Kapitel kurz vorgestellt werden, für weitere Details vgl. Grenzdörffer, 2002b.

Tab. 3.3-4: Untersuchte geometrische und radiometrische Eigenschaften der DSP 104

Geometrische Parameter	Radiometrische Parameter
- Innere Orientierung	- Farbartefakte
- Stabilität der Mechanik	- Linearität, Dynamik, Blooming
	- Rauschen (SNR)
	- Helligkeitsrandabfall
	- Spektrale Sensitivität

Im Hinblick auf die geometrischen Eigenschaften muss sicherlich die – für nicht photogrammetrische Zwecke entwickelten CCD-Sensoren typische – unzureichende mechanische Stabilität des CCD-Sensors angesprochen werden, die eine Simultankalibrierung der Parameter der inneren Orientierung bei jedem Bildflug notwendig macht. Zu den Stärken gehören hingegen die radiometrischen Eigenschaften der Kamera, z.B. die hohe lineare Dynamik über nahezu die gesamten 12 Bit, ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis und Farbfilter, die so definiert sind, dass Spektralauswertungen in weitaus besserem Maße, als mit vergleichbaren photographischen Systemen, möglich sind.

3.3.5.4.2 Radiometrische Kalibrierung des Digitalsensors

Für eine quantitative Auswertung der spektralen Reflexionseigenschaften des Bodens und des Bestandes ist eine genaue Kenntnis und Kalibrierung der radiometrischen Eigenschaften des Sensors notwendig.

Als Messgröße des Rauschens eines Systems wird das Signal-Rausch Verhältnis (SNR) angegeben, d.h. das logarithmische Verhältnis der Signalspannung zur Rauschspannung:

$$SNR = \log \frac{U_s}{U_r}$$

Diese Größen sind jedoch direkt nur über Hardwaremanipulationen zu bestimmen. Aus diesem Grunde wird das SNR indirekt über eine Analyse der Grauwerte bestimmt.

In einem einfachen Ansatz wird dazu eine gleichmäßig ausgeleuchtete und homogene Fläche mit einem stark defokussierten Objektiv aufgenommen. Dabei stellt der Mittelwert der gemessenen Grauwerte das Signal und die Standardabweichung den Rauschanteil dar. Ein Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass bei der Aufnahme eines Testfeldes mit verschiedenen definierten Reflexionsintensitäten zusätzlich die Abhängigkeit des SNR von der reflektierten Objekthelligkeit bzw. der Dichte (D) der Vorlage gemessen werden kann. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt darin, dass von einer absolut homogenen Testfläche und einer einheitlichen, diffusen Beleuchtung ausgegangen wird und damit alle Restfehler voll in das Rauschen eingehen.

Zur Bestimmung des SNR wurde ein definierter Graukeil (FotowandTM 4269) verwandt, welcher nahezu Lambertsche Reflexionseigenschaften mit einem Dichteumfang von 0 – 1,65 aufweist, sowie reflektierte Sonnenstrahlung als homogene Lichtquelle. Um das SNR über die gesamten Dynamikbereich der Kamera zu erfassen sind mehrere Aufnahmen mit unterschiedlicher Aussteuerung gemacht worden. Abb. 3.3-4 zeigt das SNR in Abhängigkeit der Dichte für vier ver-

schiedene Aufnahmen, die nahezu den gesamten Grauwertumfang der Digitalkamera umfassen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass das SNR von 5 bei geringer Belichtung und sehr hoher Dichte bis auf 130 bei hoher Belichtung und geringer Dichte reicht. Eine Abhängigkeit zwischen den Farbkanälen und dem SNR konnte nicht festgestellt werden, da das SNR bei gleicher Intensität für alle drei Farbkanäle nahezu identisch ist. Der teilweise unregelmäßige Verlauf der Kurven lässt auf Inhomogenitäten der Vorlage schließen.

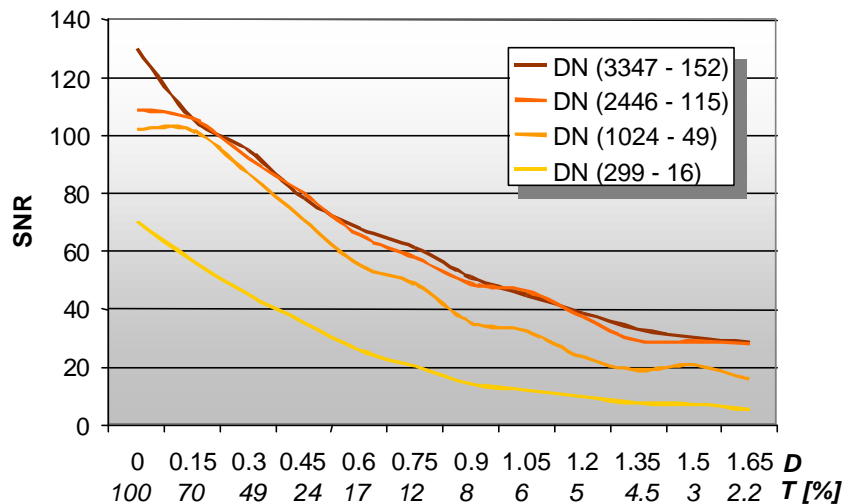


Abb. 3.3-4: SNR des CCD-Chips in Abhängigkeit der Aussteuerung der Kamera und der Dichte der Vorlage

Bei natürlichen Oberflächen, z.B. Wald, die selten eine geringere Reflektivität (= Transparenz) als 3% des eingestrahnten Lichts aufweisen, kann bei gut ausgesteuerten Aufnahmen ein $SNR > 30$ erreicht werden. Die ermittelten SNR sind im Vergleich zu herkömmlichen Erderkundungssatelliten geringfügig schlechter, gegenüber Hyperspektralscannern jedoch besser, Smith und Curran, 1999.

Zur Validierung der empirisch ermittelten Funktion sind Aufnahmen eines Bildflugs vom 6.12.2000 von Kassow ausgewählt worden, bei dem trotz sonnigen Wetters das verfügbare Licht unter Inkaufnahme einer leichten Unterbelichtung nur für eine Belichtung mit 1/60 sec. und Blende 4 ausreichte. Der Helligkeitsrandabfall ist durch die notwendige Kontraststreckung bei der 12 Bit / 8 Bit Transformation besonders deutlich, siehe Abb. 3.3-5. Mit der Einführung der Korrekturfunktion des Helligkeitsrandabfalls kann dieser Effekt jedoch fast völlig ausgeglichen werden, Abb. 3.3-5, was weitere visuelle und digitale Klassifikationsschritte wesentlich erleichtert.

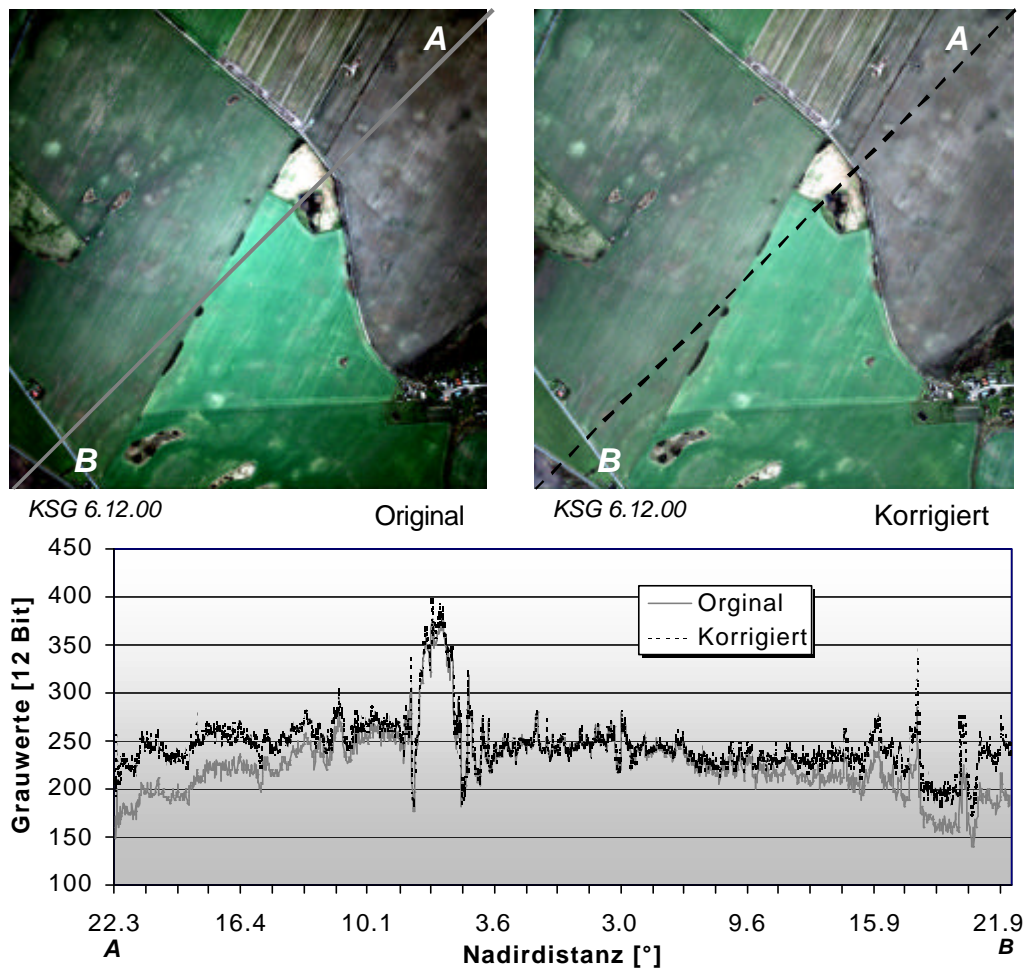


Abb. 3.3-5: Korrektur des Helligkeitsrandabfalls, Bildflug 06.12.2000, Bildnr. 13

3.3.5.4.3 Spektrale Empfindlichkeit

Zur Untersuchung der spektralen Empfindlichkeit der aufgedampften Farbfilter wurde ein kleiner Gittermonochromator der Firma Pi Optics mit einem Eingangs- und Austrittsschlitz $2 \text{ von } 3 * 0,5 \text{ mm}$ vom Institut für Optik der Universität Rostock zur Verfügung gestellt. Als Eingangslichtquelle kam ein 35 W Halogenstrahler zum Einsatz. Das austretende monochromatische Licht ist in einem Abstand von 5 mm direkt auf einen kleinen Ausschnitt des CCD-Sensors gefallen. Die vom CCD-Sensor aufgezeichneten roten, grünen und blauen Anteile des monochromatischen Lichts wurden anhand des Mittelwerts eines $20 * 30$ Pixel großen Fensters für alle Bilder bestimmt und relativ zum Gesamtsignal dargestellt, siehe Abb. 3.3-6. Aufgrund der teilweisen Interferenzen zwischen dem roten und dem blauen Licht sind bei der Kalibrierung mit dem Monochromator, neben den gemessenen Werten noch um die angesprochenen Fehler bereinigte Werte der Filtereigenschaften in der Abb. 3.3-6 eingetragen worden.

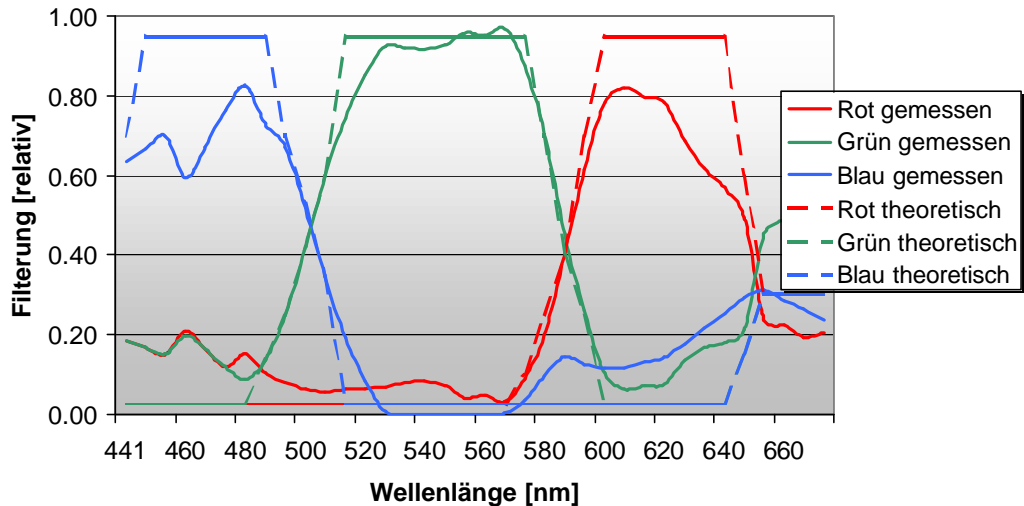


Abb. 3.3-6: Relative spektrale Empfindlichkeit der Digitalkamera

Das bedeutet, die Kamera verfügt über einen schmalen blauen Kanal mit einer Wellenlänge von etwa 445 – 505 nm, einen breiten grünen Kanal in einem Wellenlängenbereich von 505 – 590 nm und einen roten Kanal im Bereich von 590 – 655 nm. Zur Validierung der Messungen zur spektralen Empfindlichkeit der drei Farbkanäle und zur Untersuchung der Möglichkeiten der Digitalkamera für spektrale Auswertungen ist eine diffus reflektierende Farbtafel (FotowandTM 4261) aufgenommen worden. Parallel dazu sind die Reflexionseigenschaften der farbigen Testflächen mit einem Feldspektrometer (ASD Fieldspec HH) gemessen worden. Die Prüfung der Zusammenhänge zwischen den gemessenen Reflexionswerten, gemittelt für die drei Kanäle RGB und den Farbwerten der Digitalkamera, erfolgte durch eine Regressionsanalyse, siehe Abb. 3.3-7. Die Übereinstimmung für den blauen, grünen und den roten Kanal ist sehr gut, mit einem R^2 von 0,98, 0,99 bzw. 0,98, was bedeutet, dass die Digitalkamera für Spektralmessungen geeignet ist.

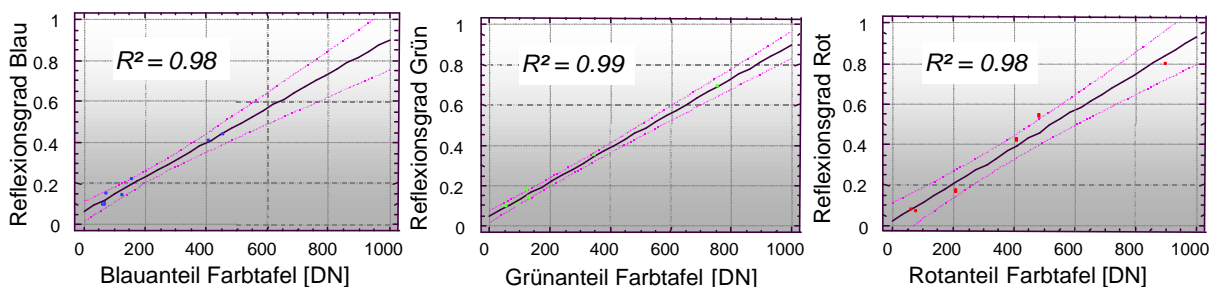


Abb. 3.3-7: Korrelation zwischen spektrometrischen Reflexionsmessungen und RGB-Grauwerten der Digitalkamera am Beispiel einer Farbtafel (FotowandTM 4261)

3.3.5.4.4 Bildflugmanagementsystem

Für den Bildflug in einem kleinen Sportflugzeug ist im Rahmen des Projekts ein Bildflugmanagementsystem entwickelt worden, bestehend aus der Bildflugplanung, der Bildflugnavigation

sowie der Aufzeichnung der Parameter der äußeren Orientierung während des Bildflugs. Bei der Registrierung der Lageparameter der äußeren Orientierung (w, j, k) als Näherungs- bzw. Startwerte für eine automatische Bildzuordnung sind dazu neue, preiswerte Sensoren eingesetzt, kalibriert und erprobt worden. Im Einzelnen handelt es sich um einen zweiachsigen Neigungssensor vom Typ NS-15/E, der die an den jeweiligen Sensorachsen anfallenden Beschleunigungsanteile des Gesamtsschwerevektors misst und einen elektronischen flüssigkeitsgelagerten Robertson RFC-250 Fluxgate Kompass. Die Sensoren sind in einem Navigationsrechner integriert und mit dem GPS-Signal synchronisiert. Um eine definierte Längsüberlappung von z.B. 60 % für photogrammetrische Zwecke zu gewährleisten ist die Funktionalität des Navigationsrechners um eine automatische GPS-gestützte Bildauslösung erweitert worden. Bei einem GPS-gestützten Bildflug wird die erste Aufnahme eines Flugstreifens über den Sucher bzw. nach dem Bildflugplan von Hand ausgelöst. Für die weiteren Aufnahmen wird die Bildfolgezeit Dt durch das v_g/h_g -Verhältnis berechnet und die Digitalkamera über den Navigationsrechner ausgelöst. Durch die kontinuierliche Berechnung des v_g/h_g -Verhältnisses wird die Bildfolgezeit laufend an die Fluggeschwindigkeit über Grund angepasst. Am Ende eines Bildstreifens wird die automatische Bildauslösung manuell beendet.

3.3.5.4.5 Durchführung von Bildflügen im Rahmen von *pre agro*

Ein grundsätzliches Problem der flugzeuggestützten Fernerkundung ist die Witterungsabhängigkeit. Während professionelle Vermessungsflugzeuge innerhalb von 2 Stunden Anflugzeit jeden Punkt in Deutschland erreichen können, und somit flexibel auf unterschiedliche Wetterkonditionen innerhalb Deutschlands reagieren können, ist dies mit einem kleinen Sportflugzeug nicht gegeben. Hier bedarf es einer intensiven logistischen Vorbereitung, um weit entfernte Regionen erfolgreich befliegen zu können. Aufgrund der geographischen Lage Rostocks gestalten sich insbesondere die Befliegungen nach Bayern und nach Beckum als eine besondere Herausforderung.

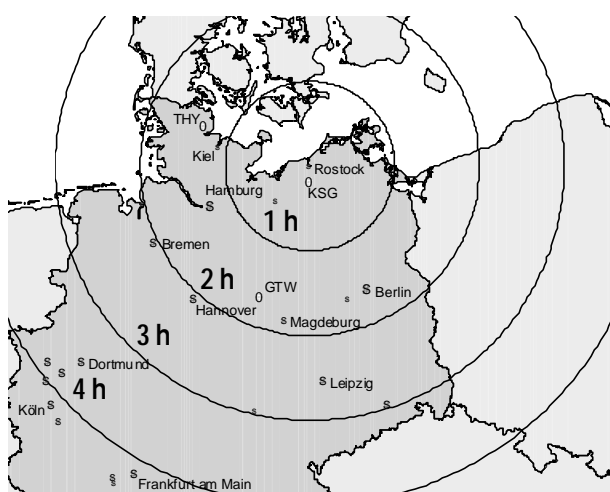


Abb. 3.3-8: Mittlere nonstop Anflugzeiten vom Flugplatz Rostock-Purkshof

Um den Vorteil der Flexibilität des low-cost Systems zu erhalten, sind in Abstimmung mit dem TP II-4 ab dem Jahr 2000 Schwerpunkträume gesetzt worden. Hierbei handelt es sich um die Betriebe GTW, THY, und KSG, sowie WIM und TAS. Diese Betriebe sind aufgrund ihrer geringeren Distanz zum Abflugort innerhalb von zwei Flugstunden erreichbar (siehe Abb. 3.3-8), so dass Wetterumschwünge und lokale thermische Bedingungen besser abgeschätzt werden können und auch die Möglichkeit einer erneuten Befliegung an einem der folgenden Tagen besteht.

Im Laufe der vier Projektjahre konnten insgesamt 47 Bildflüge an 36 unterschiedlichen Tagen erfolgreich durchgeführt werden. Die Tab. 3.3-5 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Bildflüge.

Tab. 3.3-5: Übersicht der durchgeführten Bildflüge während der Projektlaufzeit im Rahmen von *pre agro*

Jahr / Region	KSG	THY	WIM/TAS	GTW	SEDA
1999	01.04.	27.06.	19.07.	19.07.	
	06.05.	14.11.	14.09.	14.09.	
	09.07.				
	25.08.				
	25.10.				
2000	27.02.	09.04.	19.06.	10.04.	09.04.
	10.04.	27.04.		24.09.	
	27.04.	23.09.			
	22.05.				
	14.08.				
	24.09.				
	06.12.				
2001	27.03.	02.05.	23.05.	02.05.	
	24.04.	26.07.	27.07.	27.07.	
	22.05.				
	04.07.				
	27.07.				
2002	04.02.	02.04.	09.07.	03.04.	
	22.04.	09.07.		09.07.	
	21.05.				
	08.07.				
	29.07.				
	01.10.				

Aufgrund der ungünstigen Witterung konnten während der Projektlaufzeit nicht alle Bildflüge wie geplant durchgeführt werden. Zum Beispiel ließ der kühle und wolkenreiche Sommer 2000 keine ordentlich koordinierte Planung der Bildflugkampagnen zum Abreifezeitraum zu.

Zur Steigerung der Effizienz des Workflows sind zusätzliche Anstrengungen zur Automation des Postprozessings, der Archivierung und dem Metadatenmanagement (Grenzdörffer und Foy, 2000) unternommen worden.

3.3.5.4.6 Verfahren zur Georeferenzierung und erzielte Genauigkeiten

Die Aufnahmen der Projektschläge in den Jahren 1999-2001 sind in der Regel einzelbildweise mit dem Verfahren einer polynomialen Entzerrung oder des sog. Rubbersheetings, wie sie beispielsweise für die Satellitenfernerkundung zum Einsatz kommen, geokodiert worden. Anschließend sind die Einzelaufnahmen bei sehr großen Schlägen oder einer ungünstigen Aufnahmekonfiguration zu Mosaiken zusammengeführt und dabei farblich angeglichen worden. Diese Vorgehensweise hat ihre Grenzen, denn durch schwer bestimmbare Passpunkte sowie in reliefiertem Gelände nehmen die Ungenauigkeiten zum Bildrand hin zu und zwischen benachbarten Bildern treten Sprünge auf. Als problematisch erwies sich die Lokalisierung der zur Geokodierung notwendigen Passpunkte. Das resultiert aus den sehr unterschiedlichen topographischen Grundlagen und der Qualität der zur Verfügung gestellten Schlaggrenzen. Während in den alten Bundesländern die DGK 5, die ein Abgreifen von Passpunktkoordinaten mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 1,5$ m ermöglicht, flächendeckend zur Verfügung steht, ist in den neuen Bundesländern nur die TK 10 verfügbar, die eine Abgreifgenauigkeit von ca. ± 4 m ermöglicht. Bei der TK 25 verschlechtert sich die Genauigkeit durch die stärkere Generalisierung zusätzlich auf ca. $\pm 10 - 15$ m. Darüber hinaus ist eine gleichmäßige Verteilung der Passpunkte sowohl bei einer polynomialen, als auch bei einer Rubbersheet-Entzerrungsmethode Voraussetzung. Dies ist insbesondere in den Neuen Bundesländern mit der großparzelligen Struktur nicht immer gegeben. Die Lagegenauigkeit der geokodierten Aufnahmen, ausgedrückt durch den RMS nach der Ausgleichung, lag je nach Datengrundlage zwischen $\pm 1,2$ m und $\pm 8,3$ m, siehe Abb. 3.3-9.



Abb. 3.3-9: Einzelbildweise Georeferenzierung und schlagbezogene Mosaikierung des Schlags 107 Kassow, Aufnahmedatum 4.7.2001

Da eine einzelbildweise Entzerrung auf der Grundlage vieler Passpunkte sehr arbeitsaufwändig ist und das geometrische Potenzial der Digitalkamera bei weitem nicht ausschöpft, sind elegante photogrammetrische Verfahren gefragt, die - wenn möglich - ohne Passpunkte auskommen. Prinzipiell ist eine **passpunktlose Aerotriangulation** mit durch GPS hinreichend genau bestimmten Projektionszentren möglich, Ackermann, 1997. Durch die Schnittbedingungen homo-

loger Bildstrahlen, die durch die entsprechende Längs- und Querüberlappung der Bilder gewährleistet werden, können die unbekannt bzw. näherungsweise bekannten Drehparameter der Luftbilder exakt bestimmt werden. Eine Kontrolle der Fehlerfortpflanzung ist mit den beobachteten Aufnahmezentren und der Bildüberdeckung möglich. Die geometrische Stabilität des Blocks ist somit gewährleistet und terrestrische Passpunkte sind aus Genauigkeitsgründen nicht mehr erforderlich. Die Genauigkeitsverhältnisse in Lage und Höhe innerhalb eines Blocks sind, im Gegensatz zur konventionellen Aerotriangulation, homogen. Das bedeutet, dass innerhalb eines Blocks keine zusätzlichen Höhenpasspunkte notwendig sind. Jedoch macht sich am Rand ein Genauigkeitsabfall bemerkbar, der durch zusätzliche Querstreifen abgefangen werden kann, Schwiertz, 1994.

Die Ermittlung des Potenzials einer passpunktlosen Geokodierung und eine durchgreifende Kontrolle und Nachkalibrierung des entwickelten AHRS unter Flugzeugbedingungen ist mit Hilfe eines hochgenauen RTK-GPS (Leica SR 399) für die Positionsbestimmung und eines Mehr-Antennen-GPS (Astech 3DF) zur Neigungsbestimmung im Rahmen eines Bildflugs am 2.11.2000 mit zwei Blöcken in der unmittelbaren Nähe des Flugplatzes in Rostock-Purkshof erfolgt.

In einem Bore-sight-Alignment wurde der Winkeloffset zwischen den Ergebnissen der Aerotriangulation, die sich auf das Projektionszentrum beziehen und den gemessenen 3DF-Winkeln, die sich auf die auf dem Flugzeugdach montierten GPS-Sensoren beziehen, bestimmt.

Für den Block „Purkshof“ lagen Passpunkte in ausreichender Anzahl vor, so dass die Lage des Bildhauptpunktes im Rahmen einer Simultankalibrierung für den Bildflug bestimmt werden konnte. Die äußere Genauigkeit des Blocks Purkshof – gemessen an unabhängigen Kontrollpunkten – betrug bei einem Bildmaßstab von 1 : 16.500 ca. 10 cm in der Lage und 21 cm in der Höhe, was im Ergebnis mit herkömmlichen photogrammetrischen Kameras durchaus vergleichbar ist. Bei der geringeren Höhengenaugigkeit ist das Basisverhältnis der Digitalkamera zu berücksichtigen, welches um den Faktor 2,5 geringer ist als bei einer Reihenmesskammer mit einem Weitwinkelobjektiv.

Für den Block „Toitenwinkler Moorwiesen“ wurde das Konzept einer passpunktlosen Aerotriangulation angewendet, bei der nur die Positionen der Projektionszentren hochgenau in die Triangulation eingeführt werden müssen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die innere Orientierung der Kamera bekannt ist, denn durch die fehlende Redundanz ist keine Simultankalibrierung möglich. Die eingeführten Startwerte der äußeren Orientierung der L1/L2-GPS-Positionen und 3DF-Winkel erwiesen sich als hinreichend genau, um den Prozess der automatischen Verknüpfungspunktsuche erfolgreich zu initialisieren. Die äußere Genauigkeit wurde durch Kontrollpunkte /-linien aus der ALK, die nicht in die Triangulation mit einbezogen wurden, bestimmt und lag bei einem Bildmaßstab von 1 : 44.500 im Subpixelbereich, d.h. < 1 m in der Lage. Mit diesem erfolgreichen Experiment wird das hohe geometrische Genauigkeitspotenzial der Digitalkamera deutlich und Möglichkeiten einer effizienten automatischen passpunktlosen Aerotriangulation mit dem Farbdigitalsensor aufgezeigt.

Ein Vergleich der GPS-Koordinaten des hochgenauen L1/L2-Empfängers und des einfachen GPS-Empfängers ergab, unter der Berücksichtigung des Antennenoffsets zwischen den beiden Empfängern für die Projektionszentren der beiden Blöcke, dass der Garmin-Empfänger für seine

Preisklasse eine sehr hohe Genauigkeit von ca. 4 m in der Lage liefert. Auch unter Berücksichtigung der maximalen Abweichungen ist die Koordinatenqualität des Garmin-Empfängers für die Initialisierung einer automatischen Aerotriangulation ausreichend, auch wenn die Koordinaten bei der Ausgleichung nur unter günstigen Bedingungen zur Ergebnisverbesserung beitragen können.

Ein Vergleich der Winkelmessungen ergab, dass die 3DF-Winkel auf dem Flugzeugdach $0,35^\circ$ – $0,55^\circ$ von den Winkeln der Aerotriangulation abwichen. Im Gegensatz dazu wichen die direkt gemessenen Winkel des AHRS um 1° im Nickwinkel, $2,45^\circ$ im Rollwinkel sowie 14° im Kurswinkel von den indirekt bestimmten Winkel der Aerotriangulation ab. Die äußerst unbefriedigenden Werte des Kompasses sind auf mehrere Faktoren zurückzuführen, die nachträglich kaum korrigiert werden können.

Dadurch wird deutlich, dass der ursprüngliche Ansatz, mit preiswerten Sensoren die näherungsweise Bestimmung der äußeren Orientierung zu ermöglichen, nur teilweise erfolgreich war. Während die GPS-Projektionszentren als Startwerte für eine automatische Aerotriangulation hinreichend genau waren, hat die Winkelbestimmung mit dem AHRS unter den speziellen Bildflugbedingungen nur zu teilweise befriedigenden Ergebnissen geführt.

Auf der Grundlage dieses erfolgreichen Tests sind ab dem Jahr 2002 alle Bildflüge mit einer Längsüberlappung von 60 % und einem zusätzlichen hochgenauen GPS-Empfänger durchgeführt worden, siehe z.B. Abb. 3.3-10 für den Betrieb Thumby. Der Arbeitsaufwand gegenüber einer einzelschlagweisen Geokodierung ist bei den zwei bis sechs Projektschlägen pro Betrieb in etwa gleich zu bewerten, da bei einer passpunktlosen Aerotriangulation wesentlich mehr Aufnahmen verarbeitet werden müssen, und die Vorverarbeitung der verschiedenen GPS-Daten aufwändiger ist. Auf der anderen Seite verringert sich der Aufwand für die Passpunktsuche und Nachbearbeitungen bei der Mosaikierung. Bei einer betriebsweisen Betrachtung ist die passpunktlose Aerotriangulation auf alle Fälle effizienter.

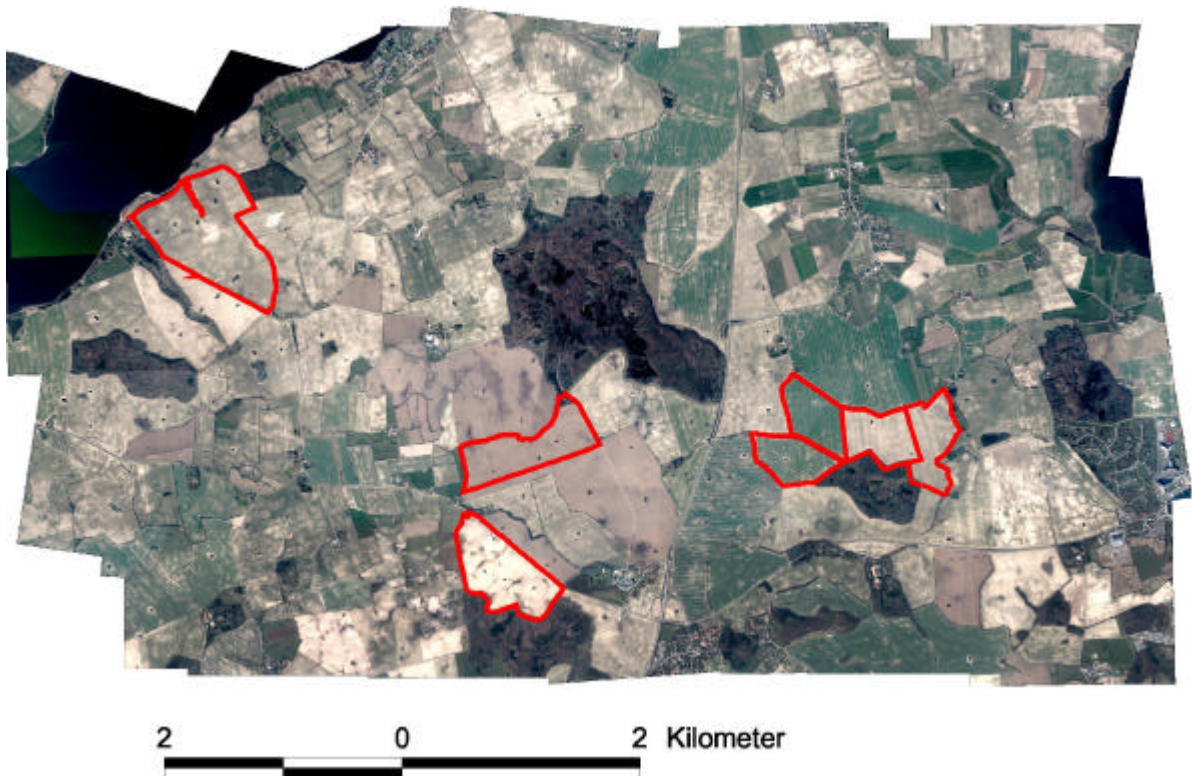


Abb. 3.3-10: Bildmosaik 2.4.2002, Region Thumby mit überlagerten Projektschlägen aus 47 Einzelaufnahmen

Voraussetzung für das Verfahren einer passpunktlosen Aerotriangulation ist ein Block von Aufnahmen, die eine Längsüberlappung von 60 % aufweisen und aus mindestens zwei Flugstreifen bestehen. D.h. bei einer selektiven Aufnahme einzelner Schläge, bzw. Aufnahmen eines Streifens sind weiterhin terrestrische Passpunkte notwendig. Dennoch bringt auch in diesem Fall die Einbeziehung der exakten Projektionszentren einen großen Genauigkeitsgewinn, wie das Beispiel der benachbarten Schläge Bullenstall und Reideberg, die durch ein Mosaik aus drei Aufnahmen vollständig abgebildet werden, wie Abb. 3.3-11 verdeutlicht.

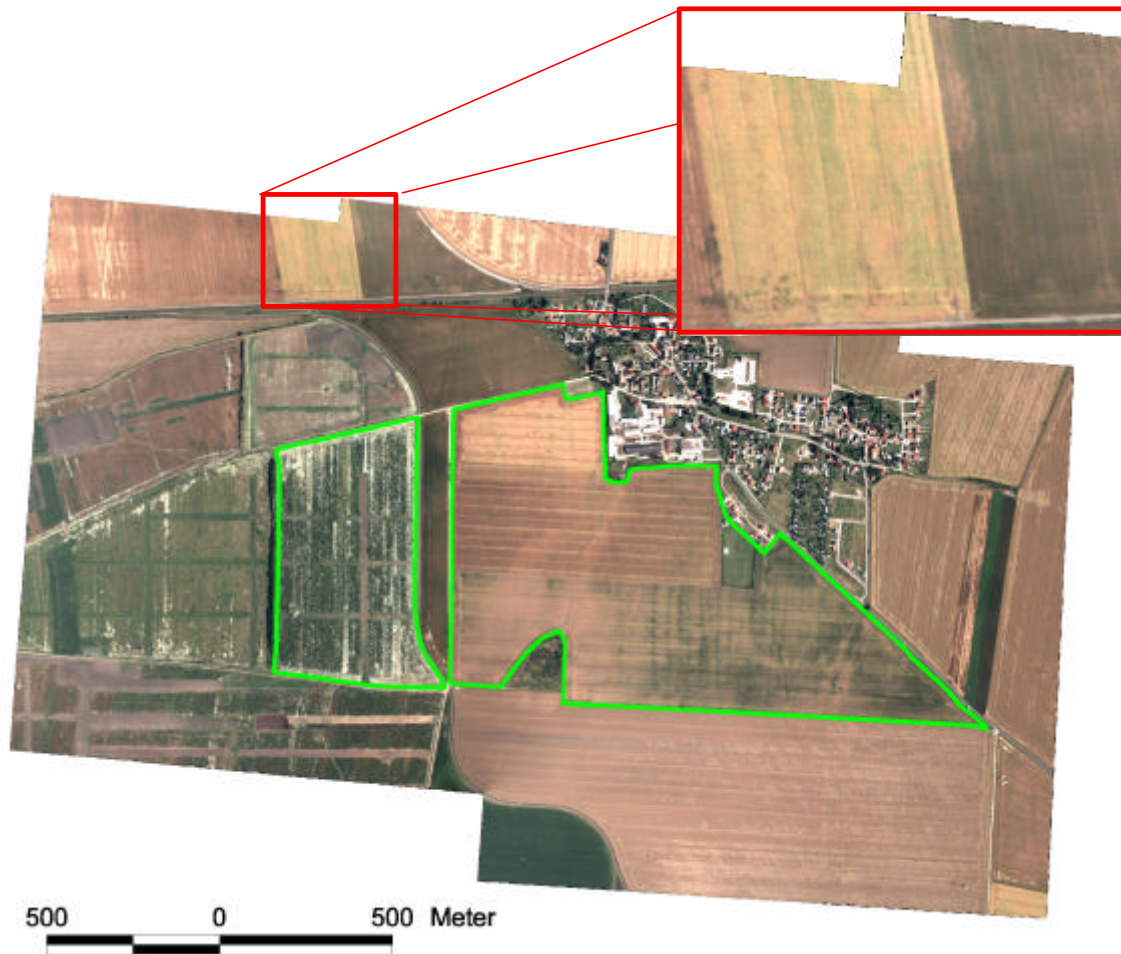


Abb. 3.3-11: Streifentriangulation aus 3 Einzelaufnahmen für die Schläge Bullenstall und Reideberg, Betrieb Queis, 09.07.2002

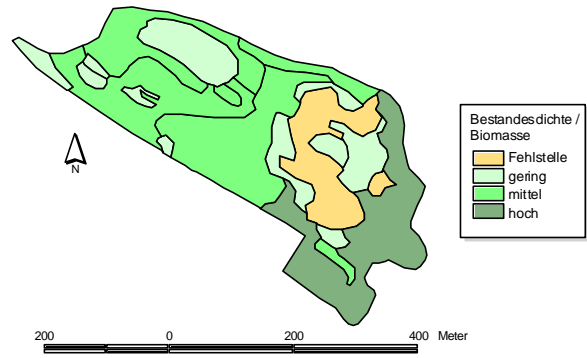
3.3.5.5 Thematische Luftbildauswertung

Neben der Möglichkeit einer effizienten Schlagvermessung ermöglichen verschiedene visuelle Interpretationsschritte von Luftbildern die raum-zeitliche Bestandesentwicklung innerhalb eines Schlages zu dokumentieren und zu analysieren. Durch eine multitemporale Analyse sind zudem Informationen über persistente bodenbedingte Einflüsse und ehemalige Nutzungsstrukturen ableitbar. In die Interpretation fließt schlagbezogenes Vorwissen über die pflanzenbaulichen Maßnahmen und Informationen über das geogene Standortpotenzial mit ein. Da der (teilflächenspezifisch) arbeitende Landwirt seine Schläge in ähnlicher Weise kennt sind auch die Aussagemöglichkeiten bzw. die Managementoptionen für den Landwirt möglich.

Neben einer deskriptiven Interpretation ist die Bestandesdichte bzw. Biomasse visuell nach einem einfachen qualitativen Interpretationsschlüssel (Fehlstelle, niedrig, mittel, hoch) kartiert worden. Die Ergebnisse sind in der Abb. 3.3-12a-f dargestellt. Aufgrund der teilweise starken Verunkrautung ist für verschiedene Termine die Verunkrautungsintensität ebenfalls kartiert worden.



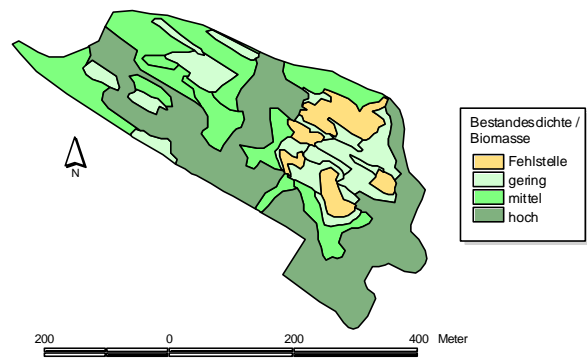
(a) Luftbildkartierung Bestandesdichte 9.8.1998



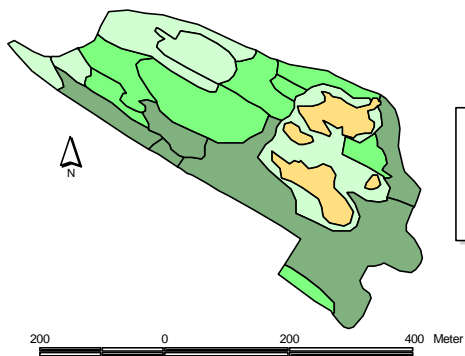
(b) Luftbildkartierung Bestandesdichte 16.10.1998



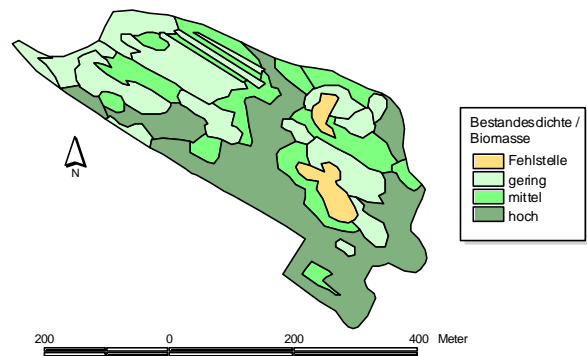
(c) Luftbildkartierung Bestandesdichte 22.12.98



(d) Luftbildkartierung Bestandesdichte 1.4.1999



(e) Luftbildkartierung Bestandesdichte 5.6.1999



(f) Luftbildkartierung Bestandesdichte 9.7.1999

Abb. 3.3-12: Luftbildkartierung der Bestandesdichte 98/99 Schlag 110 Kassow

Das räumliche Muster ändert sich während der Vegetationsperiode aufgrund unterschiedlich limitierender Einflussfaktoren. Z.B. spielen die Saatbettbedingungen in den obersten 5 cm sowie das verfügbare Wasserdargebot während der Aussaat im Herbst eine große Rolle. Im Laufe der Vegetationsperiode verursachen, neben dem Unkraut- und Pilzdruck z.B. die Bodenqualität, das Nährstoffangebot und das pflanzenverfügbare Wasser räumliche Bestandesdifferenzierungen.

Das Muster des Pflanzenbestandes verändert sich im Laufe der Vegetationsperiode und ähnelt immer mehr dem Muster der Ertragskarte, wie den Boxplots in Abb. 3.3-13 zu entnehmen ist. Die als geringe Biomasse kartierten Bereiche der Sommeraufnahme bringen einen ca. 40 % niedrigeren Ertrag gegenüber den Bereichen mit einer hohen Bestandesdichte. Dieser in Wirklichkeit noch höhere Unterschied wird durch das Fieldstar Ertragskartierungssystem aufgrund der internen Filterung nicht wiedergegeben. Auf benachbarten Schlägen sind die Unterschiede zwischen Bereichen hoher und niedriger Bestandesdichte bei ca. 50%, siehe Grenzdörffer und Gebbers, 2001. Die zum Ende der Vegetationsperiode kartierte Verunkrautung hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Ertragsleistung.

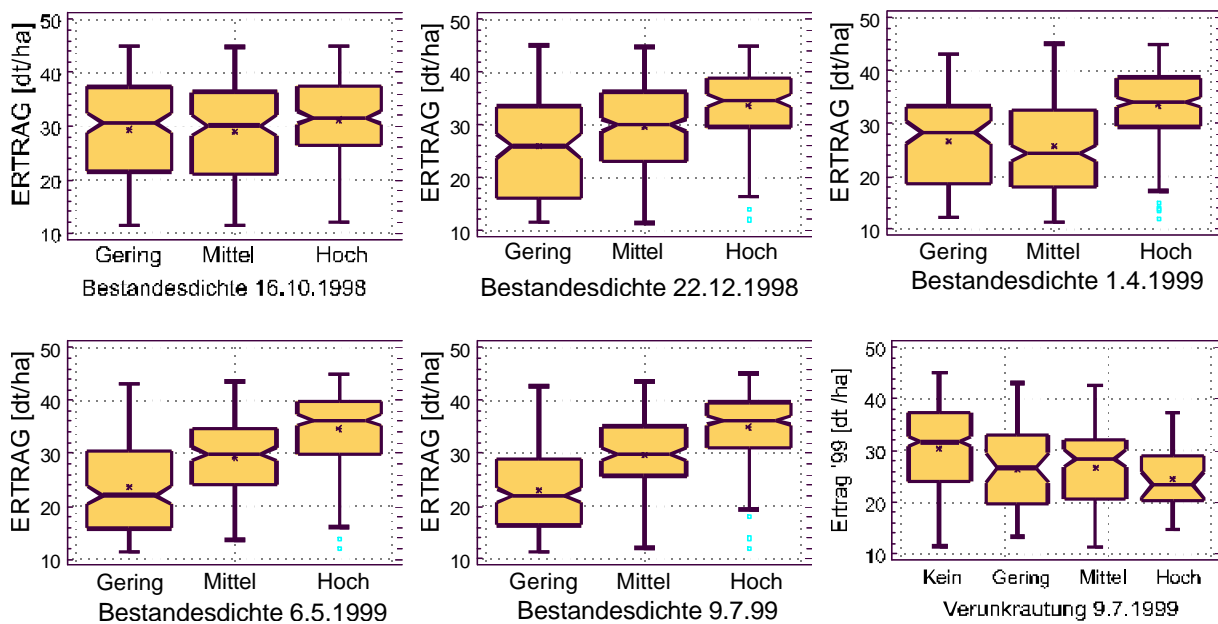


Abb. 3.3-13: Entwicklung des Zusammenhangs zwischen im Luftbild kartierter Bestandesdichte und dem Kornertrag, Schlag 110 '98/'99

Allerdings sind auf diesem Schlag die Unterschiede zwischen hoch und gering verunkrauteten Bereichen niedriger als bei anderen Schlägen, Grenzdörffer und Gebbers, 2001.

Die ertragslimitierenden Faktoren und der Erfolg von pflanzenbaulichen Maßnahmen verändern das räumliche Muster des Bestandes nicht nur innerhalb einer Vegetationsperiode sondern auch zwischen den Jahren. Verschiedene Feldfrüchte haben unterschiedliche Ansprüche an Boden, Nährstoffe, Klima, etc., was zu sehr unterschiedlichen Ertragsmustern führt, siehe für eine siebenjährige Auswertung auch Grenzdörffer und Gebbers, 2001. Für den Schlag 110 ist beispielhaft eine Regression zwischen der ECA-Karte und dem Ertrag für 1999 (Winterraps) sowie 2000 (Wintergerste) berechnet worden (Abb. 3.3-14).

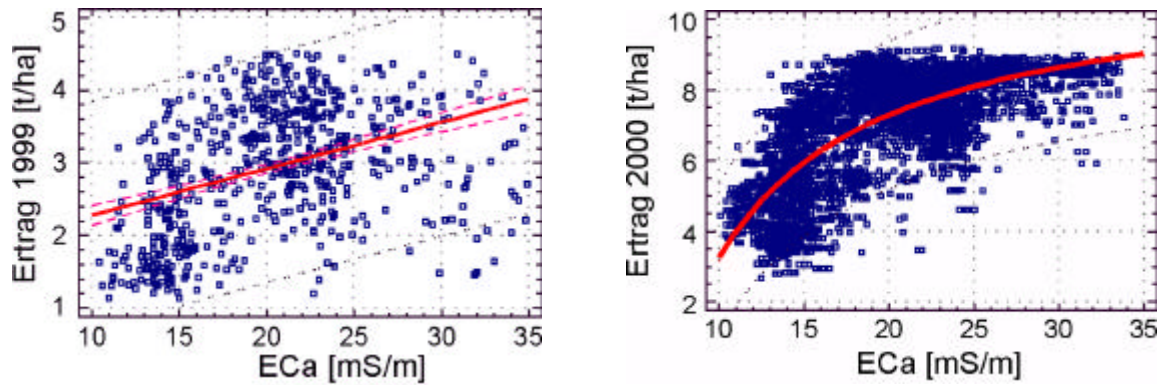


Abb. 3.3-14: Regressionsanalyse Kornenertrag 1999 und 2000 gegenüber der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit

Der sehr schwache Zusammenhang von 0,15 (R^2) zwischen dem Ertrag '99 und der ECa-Karte ist im wesentlichen auf die von den Schnecken verursachte große Schadstelle sowie auf die teilweise starke Verunkrautung zurückzuführen. Das höhere Bestimmtheitsmaß von 0,44 zwischen dem Ertrag 2000 und der ECa-Karte ist wahrscheinlich durch die Frühsommertrockenheit 2000 bedingt, bei der das pflanzenverfügbare Wasser im sandigen Boden zum limitierenden Faktor wurde und somit die Beziehung zwischen der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit und dem Ertrag verdeutlicht.

3.3.5.6 Analyse der Bestandesentwicklung durch Farbluftbilder

Die Möglichkeiten der fernerkundlichen Analyse von Echtfarbenluftbildern zur räumlich differenzierten Bestandesentwicklung mit einem Schwerpunkt auf den Parametern Bestandeshöhe und Kornenertrag standen im Vordergrund der Diplomarbeit von T. Johnen (2001), deren Ergebnisse im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen. Als Untersuchungsgebiet wurde der Schlag 106 der KSG Kassow ausgewählt. Der ca. 77 ha große Schlag war in der Vegetationsperiode 2001 mit Winterweizen bestellt und Gegenstand eines umfangreichen N-Düngungsexperiments des TP III-4. Insgesamt wurden vier Aufnahmen zwischen dem 24.4.2001 und 27.7.2001 verwendet, die mit einfachen parametrischen Ansätzen und einer Lagegenauigkeit von $\pm 2 - 3,5$ m geokodiert und anschließend thematisch ausgewertet wurden, siehe Abb. 3.3-15.

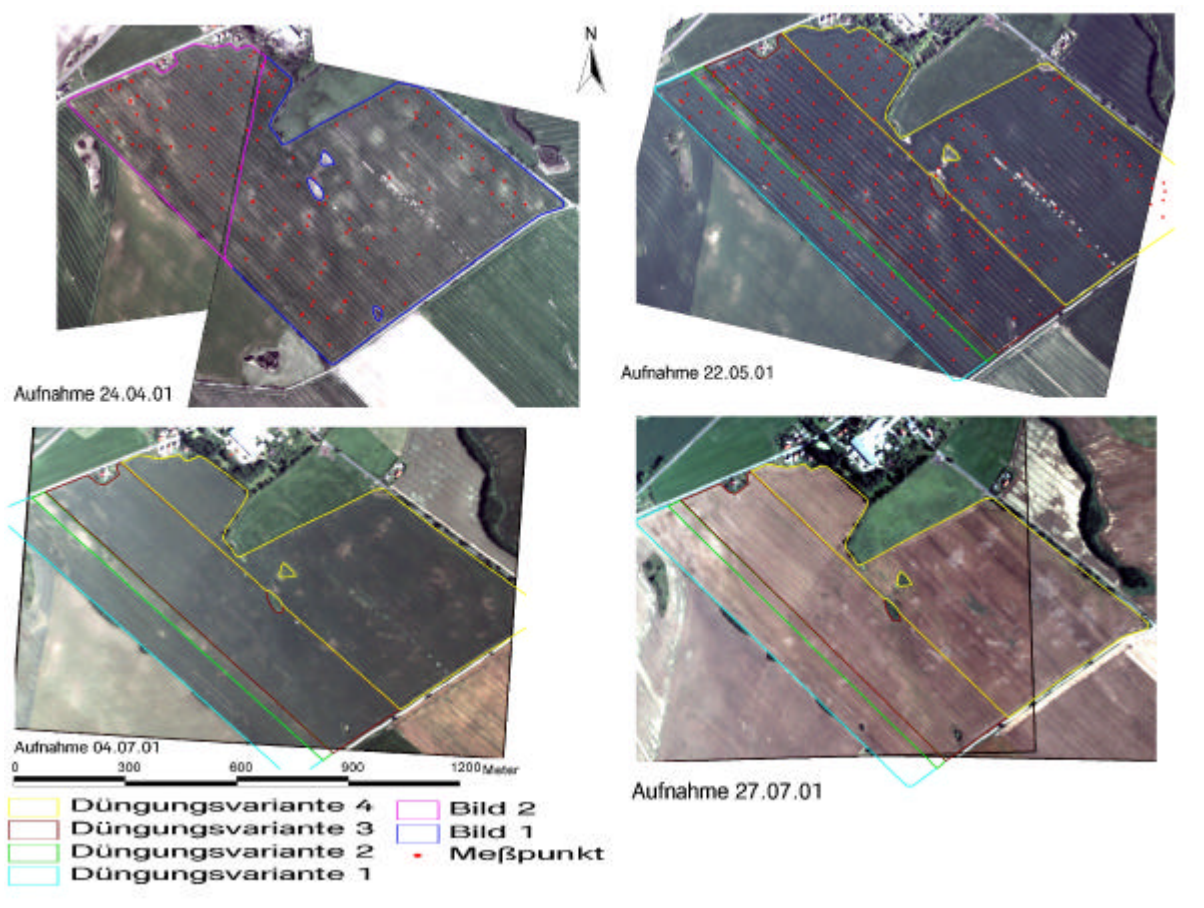


Abb. 3.3-15: Untersuchte Luftbilder, Schlag 106 der KSG Kassow mit eingetragenen Messpunkten der Bestandeshöhe und den verschiedenen Düngevarianten des Feldversuchs

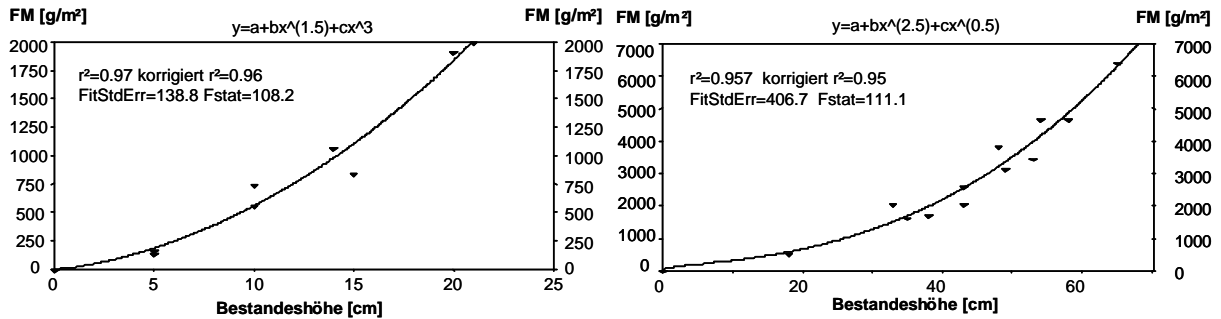
Als Ground Truth wurden mehrere Bestandesparameter möglichst zeitnah zu den Aufnahmen erfasst, die in der Tab. 3.3-6 zusammengestellt sind.

Die Bestandeshöhenmessung erfolgte mit Hilfe einer 1 m² großen verwindungssteifen Kunststoffplatte, bei der die in der Mitte angebrachte Skala schnelle und belastbare Messergebnisse liefert. Die Mindesthöhe des Bestandes beträgt ca. 10 – 15 cm. Die Messgenauigkeit hängt vom Erfassungszeitpunkt ab und schwankt zwischen ca. 1 cm in der Höhe bis zur Blüte und bis zu 3 cm in der Abreifephase, Johnen, 2001.

Tab. 3.3-6: Übersicht der verwendeten Luftbilder und der erhobenen Ground Truth Daten auf dem Schlag 106 Kassow

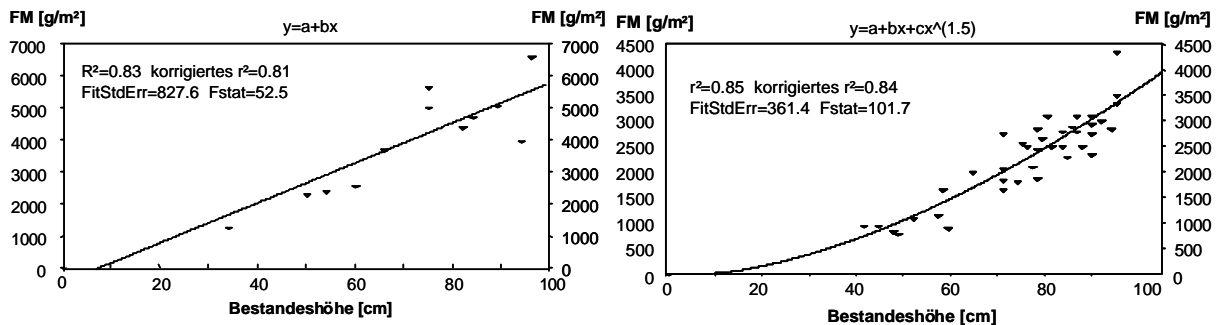
Aufnahme datum	Uhrzeit	Anz. Bilder	Phänologische Situation	Bestandeshöhenmessung	Handernten	Erhobene Parameter
24.04.2001	15:51	2	Schossbeginn	25. - 27.04.2001	27.04.2001	FM TM
22.05.2001	12:59	1	Erscheinen des letzten Blattes	23. - 25.05.2001	25.05.2001	FM TM
04.07.2001	10:00	1	Ende Blüte / Beginn Reife	04. - 09.07.2001	10.07.2001	FM TM
27.07.2001	16:54	2	Reife	23. - 25.07.2001	27.07.2001 18.08.2001	FM Korngewicht TKG Ährenzahl/m ²

Die Bestandeshöhe korreliert sehr stark mit der Frischmasse, wobei der Zusammenhang im Laufe der Vegetationsperiode etwas nachlässt, wie die nachfolgende Abb. 3.3-16 verdeutlicht. Anders verhält es sich mit der Trockenmasse, die insbesondere in der Reifephase durch unterschiedliche Kornanteile einen nichtlinearen Zusammenhang zur Bestandeshöhe aufweist, Abb. 3.3-16.



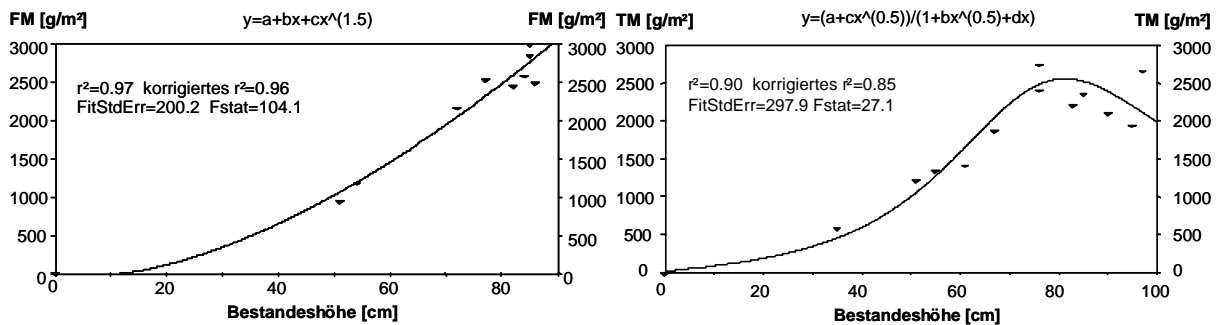
Schätzkurve der FM durch die Bestandeshöhe (27.04.2001)

Schätzkurve der FM durch die Bestandeshöhe (22.05.2001)



Schätzkurve der FM durch die Bestandeshöhe (10.07.2001)

Schätzkurve der FM durch die Bestandeshöhe (27.07.2001)



Schätzkurve der FM durch die Bestandeshöhe (18.08.2001)

Schätzkurve der TM durch die Bestandeshöhe (10.07.2001)

Abb. 3.3-16: Schätzkurven der Frischmasse (FM) und der Trockenmasse (TM) durch die Bestandeshöhe, Schlag 106, Johnen (2001)

Direkte lineare korrelative Beziehungen zwischen den fernerkundlichen Bilddaten, entweder direkt als RGB-Werte oder indirekt über einen Index zu den gemessenen Bestandesparametern, sind sehr unterschiedlich ($R^2 = 0,23 - 0,74$). Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Düngevarianten deutlich. Eine Ursache der relativ geringen Zusammenhänge ist sicher auf die phänologisch etwas ungünstigen Flugtermine vom 22.5. sowie zum 04.07. und 27.07. zurückzuführen. Die Zeitpunkte 22.05. und 04.07. markieren den Beginn bzw. das Ende der Sättigungsphase der

Indexwerte mit GLAI-Werten > 3 (vgl. Kap. 3.3.5.9.6). Die Aufnahme vom 27.07. zum Zeitpunkt der Gelbreife lässt ebenfalls nur bedingte Schlüsse auf die Bestandesheterogenität zu, da so gut wie keine grünen Vegetationsanteile zu beobachten sind. Weitere Gründe für die teilweise geringen Bestimmtheitsmaße sind in der großen Mikrovariabilität des Bestandes begründet sowie auf Positionierungsungenauigkeiten des GPS-Handempfängers bei der Erfassung der Bestandesdaten im Feld und Restfehler durch die einzelbildweise Geokodierung zurückzuführen.

3.3.5.6.1 Empirische Untersuchungen zur Mikroheterogenität des Pflanzenbestandes

Ein großer Anteil der räumlichen Bestandes- und Ertragsvariabilität ist auf die Bewirtschaftungsaktivitäten des Landwirts zurückzuführen. Diese Effekte sind im Großen, z.B. durch die witterungsbedingte Verzögerung einer Maßnahme auf verschiedenen Schlagteilen wie im Kleinen, z.B. bei der unterschiedlichen Funktionstüchtigkeit einzelner Düsen einer Pflanzenschutzspritze zu beobachten. Auf den Luftbildaufnahmen ist diese Art der Heterogenität im Allgemeinen durch ein geometrisches Muster in Form von Streifen, Lücken oder Rechtecke sichtbar. Diese Form der Heterogenität unterscheidet sich deutlich von naturräumlichen Unterschieden, die in der Regel kontinuierliche Übergänge aufweisen.

Im Betrieb Kassow kommt es durch die pfluglose Bewirtschaftung und das Breitsaatverfahren zu einer zusätzlichen Mikroheterogenität. Diese ist für eine teilflächenspezifische Bonitur und bei der Auswertung der fernerkundlichen Daten sehr störend. Um die Mikroheterogenität zwischen den Fahrgassen exemplarisch zu erfassen wurde am 25.07.2001 ein Bestandeshöheprofil längs und quer zur Fahrgasse gelegt, siehe Abb. 3.3-17.

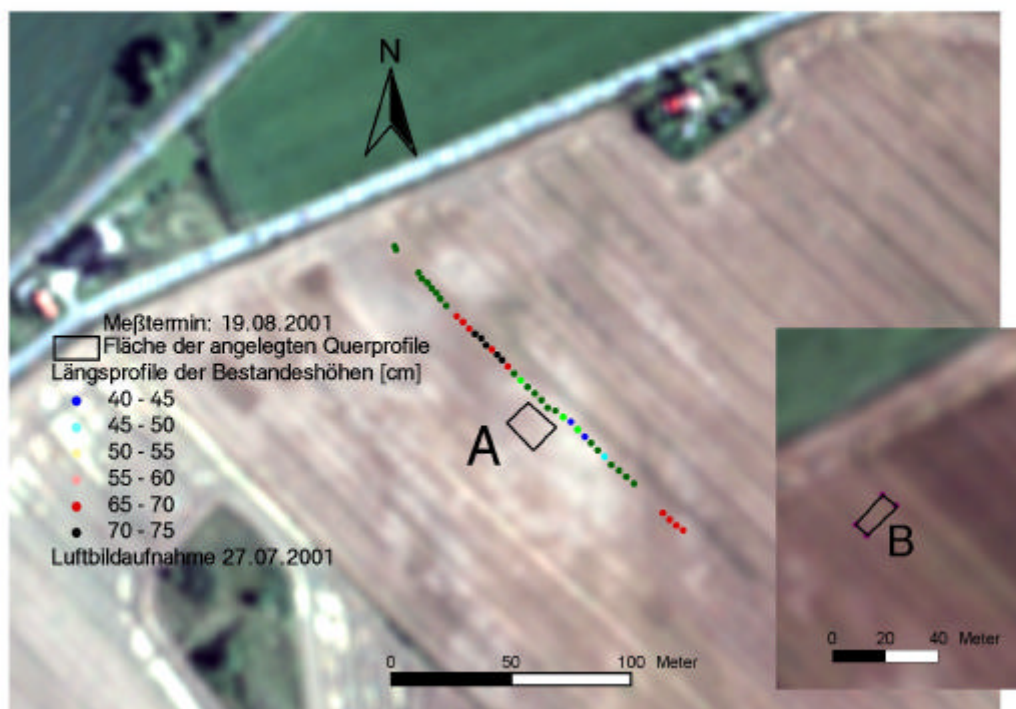


Abb. 3.3-17: Messfelder A u. B sowie Längsprofil zur Messung der Mikroheterogenität der Bestandeshöhen (Johnen, 2001)

Bei dem ca. 220 m langen Längsprofil, in dem die Bestandeshöhe in einem Abstand von 4 m jeweils mit vier Wiederholungen ermittelt wurde, zeigte sich, dass sich die Bestandeshöhe innerhalb weniger Meter stark ändert. Das betrifft nicht nur die gemittelten Absolutwerte, sondern auch die Standardabweichungen, die bis zu 20 cm erreichen können, Abb. 3.3-18.

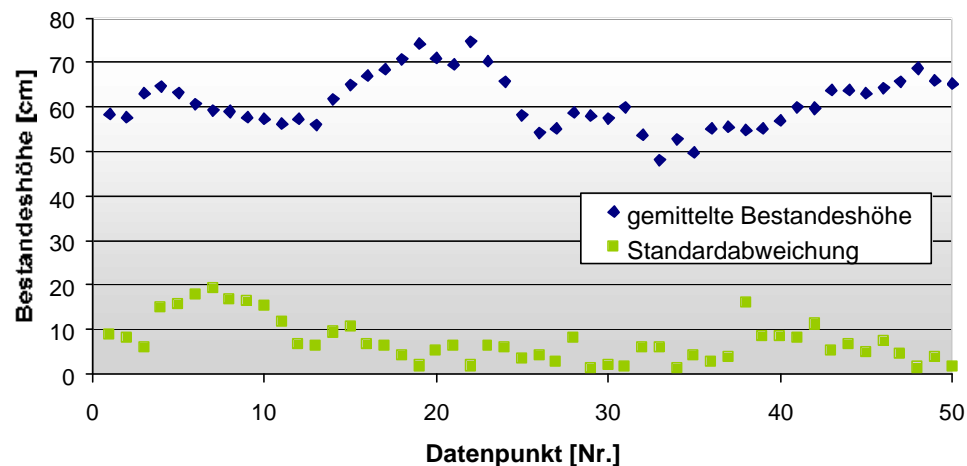


Abb. 3.3-18: Ca. 220 m Profil der gemittelten Bestandeshöhen aus jeweils zwei Messungen rechts und links der Fahrgasse mit ihren Standardabweichungen aus den vier Wiederholungen (Johnen, 2001)

Weiter wird deutlich, dass die Standardabweichung der vier Messwiederholungen quer zur Bearbeitungsrichtung mit teilweise über 10 cm sehr hoch ist.

Neben dem Längsprofil wurde auf zwei abgesteckten Flächen die Bestandeshöhe kontinuierlich gemessen. Fläche A befindet sich in dem nicht gedüngten Bereich und Fläche B im östlichen Bereich des Schlages, der mit Injektionsdüngung und Hühnerdung gedüngt wurde. Die Standorte unterscheiden sich jedoch nicht nur hinsichtlich der Düngung, sondern auch im Hinblick auf die elektrische Leitfähigkeit und den TW-Index. So liegen die Werte des TWI für Fläche A alle bei 9, während die der Fläche B sich zwischen 10 und 14 bewegen. Auch die elektrische Leitfähigkeit liegt mit 36 mS/m für Fläche B höher als für Fläche A (18 - 29 mS/m). Bei diesem Vergleich sollte untersucht werden, inwiefern sich gute Bestände und schlechter entwickelte Bestände in ihrer kleinräumigen Heterogenität unterscheiden, wobei das Auswahlkriterium die Bestandeshöhe war. Bei Betrachtung der Abbildungen Abb. 3.3-19 und Abb. 3.3-20 wird deutlich, dass der Bestand der Fläche A wesentlich unruhiger ist und die Bestandeshöhen zwischen 45 und 75 cm schwanken, im Gegensatz zu Messfeld B, wo die Schwankung zwischen 75 und 90 cm liegt. Bei Fläche B fällt auf, dass bei 6 m quer zur Fahrspur die Bestandeshöhe einbricht. Dies könnte auf Probleme bei der Aussaat zurückzuführen sein. So ist möglicherweise bei der Saattreibereibereitung kein sauberer Anschluss an die folgende Saatreihe erfolgt.

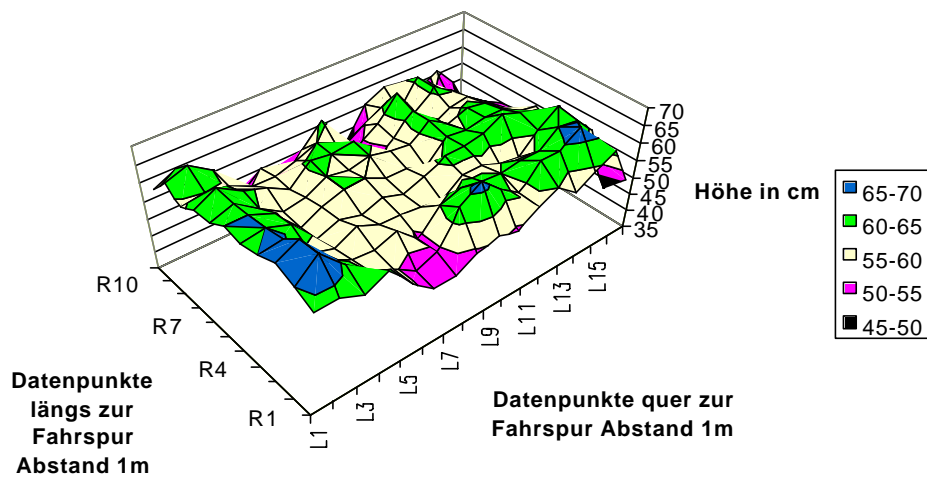


Abb. 3.3-19: Dreidimensionale Darstellung der Bestandeshöhe des Messfeldes A

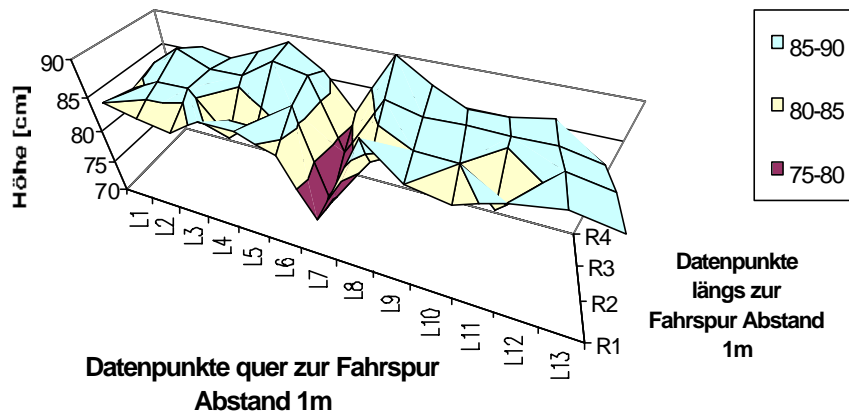


Abb. 3.3-20: Dreidimensionale Darstellung der Bestandeshöhe des Messfeldes B

Im vorliegenden Fall war die Standardabweichung der Bestandeshöhe bei schlechteren Beständen größer als bei gut entwickelten. Ob dies verallgemeinerbar ist, bzw. inwieweit die Faktoren Boden, Wasserverfügbarkeit und Düngung dafür ausschlaggebend sind, bedarf zukünftiger Untersuchungen.

3.3.5.7 Multitemporale Ertragsmusteranalyse durch Satellitenfernerkundung am Beispiel der Region Thumbby

Zur Untersuchung des langjährigen Ertragsmusters wurden für den Betrieb Thumbby drei Landsat TM 5 Miniszene mit einer Flächenabdeckung von 50 * 50 km beschafft und im Rahmen der Diplomarbeit von S. Klimek (2001) ausgewertet, siehe Abb. 3.3-21. Die methodische Vorgehensweise und die wichtigsten Ergebnisse sollen nachfolgend vorgestellt werden.

Im Rahmen des Precision Agriculture ist die Ermittlung von Ertragspotenzialen und ihre räumlichen Muster von großer Bedeutung. Da Vegetationsindizes während der Seneszenzphase teilweise sehr hoch mit dem Ertrag korrelieren, galt es im Rahmen der Diplomarbeit zu überprüfen, ob multitemporale Landsat TM Satelliten-

bildaufnahmen geeignet sind, um diese Ertragsmuster zu erfassen und ggf. deren Ursachen zu ermitteln. Mit Hilfe von Satellitenbildaufnahmen kann darüber hinaus auch die ackerbauliche Landnutzung flächendeckend ermittelt werden, die z.B. für regionale Modellierungen wie sie im TP IV-4a durchgeführt wurden, eine wichtige Eingangsgröße darstellen.

Die Auswahl geeigneter Satellitenszenen gestaltete sich schwierig, da der Aufnahmetermin günstiger Weise in der ersten Julihälfte liegen sollte. Aus dem Archiv des europäischen Satellitendatenvertreibers Eurimage¹ konnten aus den verfügbaren Landsat TM Szenen der letzten 20 Jahre fünf erfolgsversprechende Aufnahmen, anhand des Bewölkungsgrads und kleinen Vorschaubildern herausgefiltert werden, von denen drei Aufnahmen ausgewählt wurden. In der Tab. 3.3-7 sind die meteorologischen Aufnahmebedingungen und die phänologische Entwicklung der Hauptkulturen zum Zeitpunkt der Satellitenbildaufnahmen zusammengefasst.

Anhand der phänologischen Daten der Station Flensburg, die nachträglich von der Lehr- und Versuchsanstalt für Landwirtschaft Futterkamp freundlicher Weise zur Verfügung gestellt wurden, zeigt sich, dass trotz annähernd gleicher Aufnahmezeitpunkte die phänologische Entwicklung recht unterschiedlich ist.

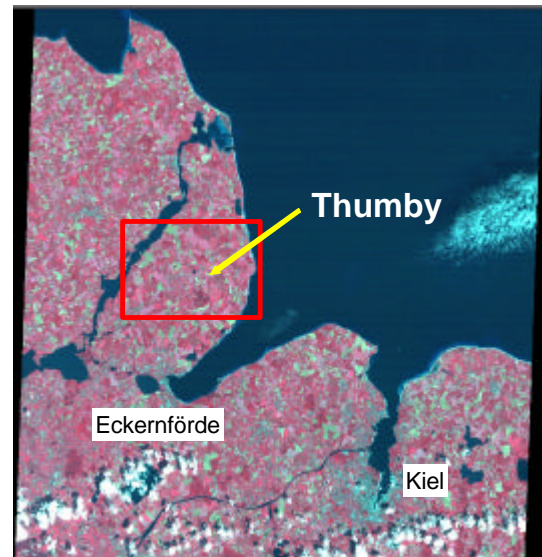


Abb. 3.3-21: Landsat TM 5 Miniszene, 3.7.2000

¹ <http://www.eurimage.com>

Tab. 3.3-7: Meteorologische und phänologische Situation zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten der untersuchten Landsat TM Szenen der Region Thumbby

Landsat TM Szene	1 / `95	2 / `97	3 / `00
Aufnahmedatum	27.06.1995	11.07.1997	03.07.2000
Überflugzeit (MEZ)	11:26:21 Uhr	11:44:51 Uhr	11:51:16 Uhr
Lufttemperatur	max: 24,5 °C min: 13,3 °C	max: 23,2 °C min: 11,0 °C	max: 21,6 °C min: 7,9 °C
Temperaturmittel im Erdboden	10 cm: 24,8 °C 20 cm: 21,7 °C	10 cm: 23,7 °C 20 cm: 21,5 °C	min: 12,6 °C max: 17,0 °C
Letzter Tag mit Niederschlagsmeldung vor dem Meldetag	24.06.1995	03.07.1997	30.06.2000
14-Tagessumme der Niederschlagshöhe vor dem Meldetag (Bodenfeuchte)	24,8 mm	34 mm	24,2 mm
Sonnenscheindauer	14,6 h	14,2 h	k.A.
Phänologie Winterweizen (EC)	66	69-71	77
Phänologie Wintergerste (EC)	71-72	87	91
Phänologie Winterraps (EC)	71-80	85	90-91

Das Preprocessing der drei Satellitenszenen umfasst eine Atmosphärenkorrektur mit dem Programm ATCOR 2.1, die für eine multitemporale Analyse unabdingbar ist und die Geokodierung durch ein Polynom 2. Grades. Um bei der Analyse den Objektraum auf das wesentliche, d.h. die landwirtschaftlichen Flächen, zu konzentrieren und die Mischpixelproblematik an den Feldrändern zu minimieren, sind verschiedene Masken auf der Grundlage von ATKIS erstellt worden.

Da zu den Aufnahmezeitpunkten eine vollständige Vegetationsbedeckung vorausgesetzt werden kann, d.h. der Einfluss der Bodenreflexion ist vernachlässigbar, wurde der NDVI als Vegetationsindex ausgewählt. Bei der ersten Betrachtung der Vegetationsindizes der verschiedenen Satellitenszenen fiel auf, dass für die Winterweizenschläge nur in der Szene vom 3.7.2000 die NDVI-Werte nicht bei ca. 0,9 gesättigt sind, sondern über einen größeren Bereich schwanken und eindeutige Variabilitäten innerhalb der Schläge zu beobachten sind. Dies ist im wesentlichen auf die unterschiedlichen phänologischen Entwicklungsstände zurückzuführen, denn erst mit dem Beginn der Reifephase kommt es zu deutlichen, spektral sichtbaren Veränderungen im Pflanzenbestand, siehe Abb. 3.3-22.

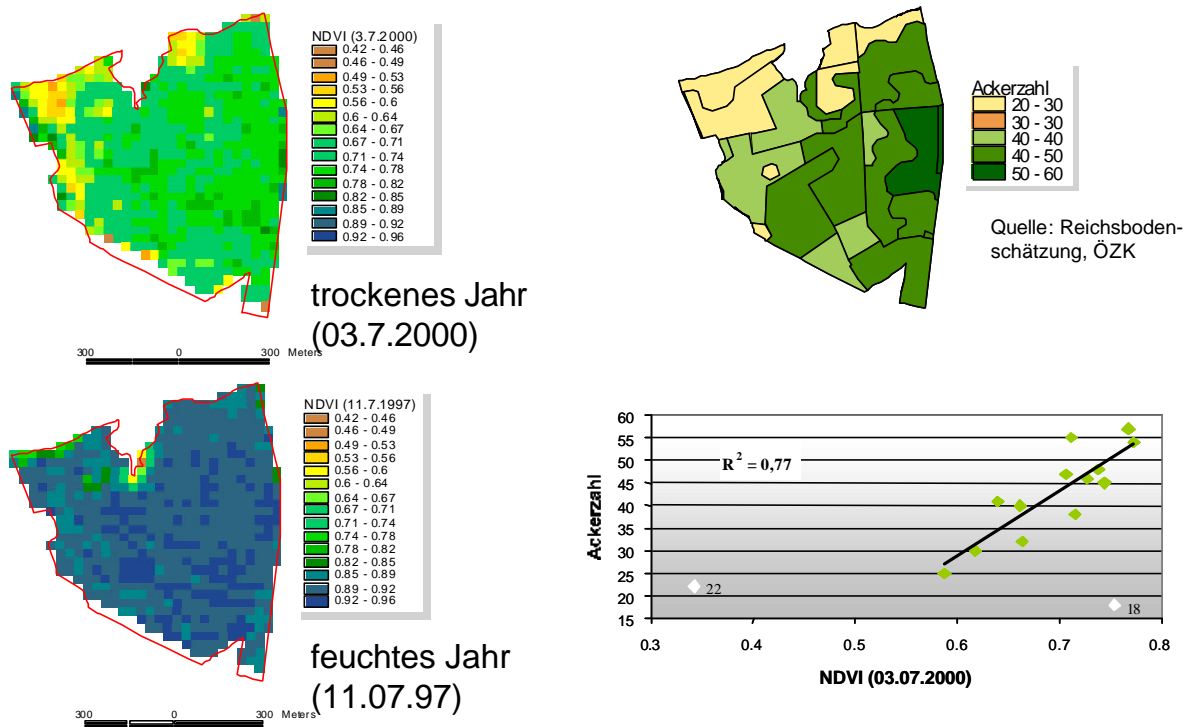


Abb. 3.3-22: Vergleich von Satellitenbilddaufnahmen und Reichsbodenschätzung in einem trockenen (2000) und einem feuchten Jahr (1997)

Bei der Aufnahme vom 03.07.2000 bleibt festzuhalten, dass die Ursache der auftretenden Bestandesheterogenität innerhalb der betrachteten Winterweizenschläge die unterschiedlichen, stark wechselnden Bodenqualitäten sind, siehe Abb. 3.3-22. Der kleinräumige Wechsel des Standortfaktors Boden führt innerhalb von landwirtschaftlichen Flächen zu einer hohen räumlichen Variabilität der Standorteigenschaften. Als verstärkender Faktor für die ausgeprägte kleinräumige Bodenheterogenität kommen die geringen Niederschlagsmengen in den Monaten April bis Juli hinzu. Dabei ist klar, dass der Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Ertragsentwicklung immer in enger Wechselwirkung mit der Jahreswitterung steht. Diese verstärken, vor allem auf Teilflächen mit geringer Bodenqualität als limitierendem Faktor, die spektrale Variabilität innerhalb der Schläge.

Um den Einfluss der Bodenqualität auf den NDVI zu quantifizieren, wurden die Ackerzahlen der Reichsbodenschätzung mit dem NDVI in Beziehung gesetzt. Dazu wurden zwei Schläge mit sehr heterogenen Bodenverhältnissen aus dem Datensatz vom 03.07.00 selektiert (WW, Sorte: Flair, EC: ca. 77, zusammengefasst: 96,5 ha). Die NDVI-Werte der beiden Schläge streuen in dem Wertebereich zwischen 0,3 und 0,96 mit einer Standardabweichung von 0,1, das arithmetische Mittel liegt bei 0,71. Die Bodeneigenschaften werden durch die Ackerzahl aus der Reichsbodenschätzung charakterisiert. Nach der Reichsbodenschätzung variieren die Ackerzahlen für die betrachteten Schläge in dem Wertebereich zwischen 18 und 57 ($\bar{\varnothing}$: 42). Die mit der Ackerzahl von 18 bzw. 22 bewerteten ehem. Niedermoore sind nicht in die Regressionsanalyse mit eingeflossen. Die Regressionsanalyse unterstreicht den signifikanten Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,77 (siehe Abb. 3.3-22).

Auf der Schlägebene konnte bei der Feldfrucht Winterweizen für 6 Schläge (Sorte: Ritmo, EC: ca. 77, Aufnahmedatum: 03.07.2000) mittels linearer Regressionsanalysen ein schlagbezogener Zusammenhang zwischen den gemittelten Erträgen und dem NDVI ermittelt werden, Abb. 3.3-23.

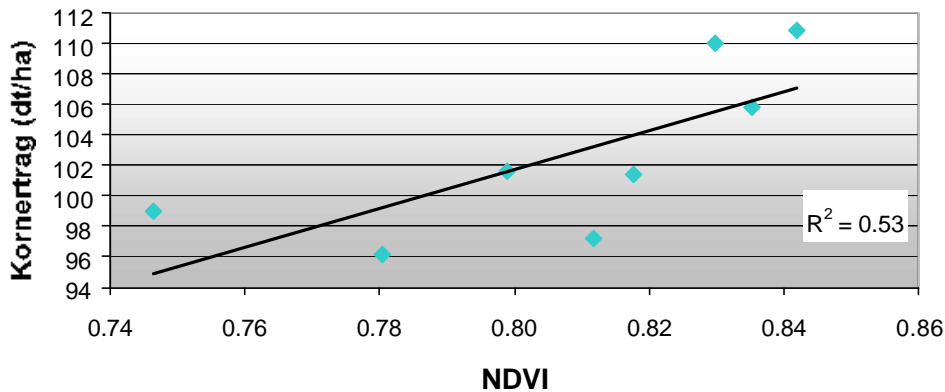


Abb. 3.3-23: Zusammenhang zwischen NDVI und Ackerzahl bei Winterweizen (Sorte: Ritmo, EC: ca. 77)

Dieser Zusammenhang ist auch auf der Teilschlägebene der gleichen Szene nachweisbar. Im Jahr 2000 liegen im Premis für fünf ausgewählte Schläge des Referenzbetriebes teilschlagspezifische Ertragskartierungen vor. Die gemessenen Ertragsdaten (Trockenertrag in t/ha) beziehen sich auf ein 50 m Raster. Aus den gemessenen rasterbezogenen Ertragsdaten können viele Informationen abgeleitet werden, wobei nur aus mehrjährigen Ertragsdaten gemittelte langjährige Ertragsmuster bestimmt werden können, die das Ertragspotenzial der Teilflächen widerspiegeln, vgl. Grenz-dörffer und Gebbers, 2001. Die Ergebnisse lokaler Ertragskartierungen können nach Griepentrog, 1999 jedoch mit einem beträchtlichen Gesamtfehler von bis zu 10 % behaftet sein.

Da teilflächenspezifische Ertragsdaten nur für das Aufnahmejahr 2000 vorliegen, wurde der Projektschlag Pensholz (WW, Sorte: Pepital, EC: ca. 77, 24 ha, schlagbezogener Durchschnittskorn-ertrag: 8,56 t/ha) näher untersucht. Die rasterbezogenen Trockenerträge (in t/ha bezogen auf 14,5 % Feuchtegehalt) schwanken zwischen 5,28 und 9,82 t/ha. Der Wertebereich des NDVI streut für den Schlag Pensholz zwischen 0,76 und 0,9 (Mittelwert: 0,83).

Zwischen den gemittelten rasterbezogenen NDVI-Werten und der Ertragskartierung des Mähdre-schers besteht ein signifikanter Zusammenhang, der durch $R^2 = 0,51$ ausgedrückt wird. Die Reg-ressionsanalyse verdeutlicht den Zusammenhang zwischen NDVI und Trockenertrag (siehe Abb. 3.3-24). Die Ergebnisse konnten jedoch nicht auf andere Projektschläge übertragen werden, da dort die NDVI-Werte kaum streuen bzw. die bodenbedingte Heterogenität verbunden mit gerin-gen Niederschlagsmengen sich nicht in einer höheren Variabilität des NDVI äußern.

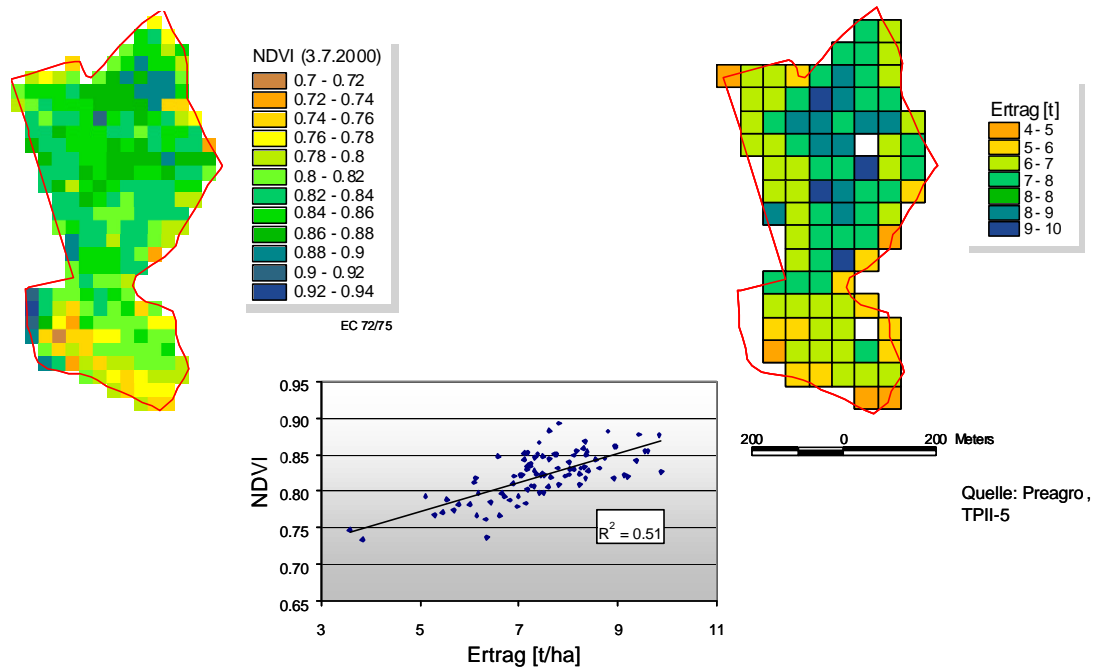


Abb. 3.3-24: Vergleich von Satellitenaufnahmen und Ertragskartierung (Schlag Pensholz, Thumby)

Die Bestimmung der Flächennutzung ist ein „klassischer“ Anwendungsbereich der Satellitenfernerkundung, z.B. zur Kontrolle von EU-Beihilfen. Durch eine multispektrale Landnutzungs-klassifikation konnten für die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Hauptkulturen eine Klas-sifikationsgenauigkeit von ca. 90 % erzielt werden (siehe Abb. 3.3-25).

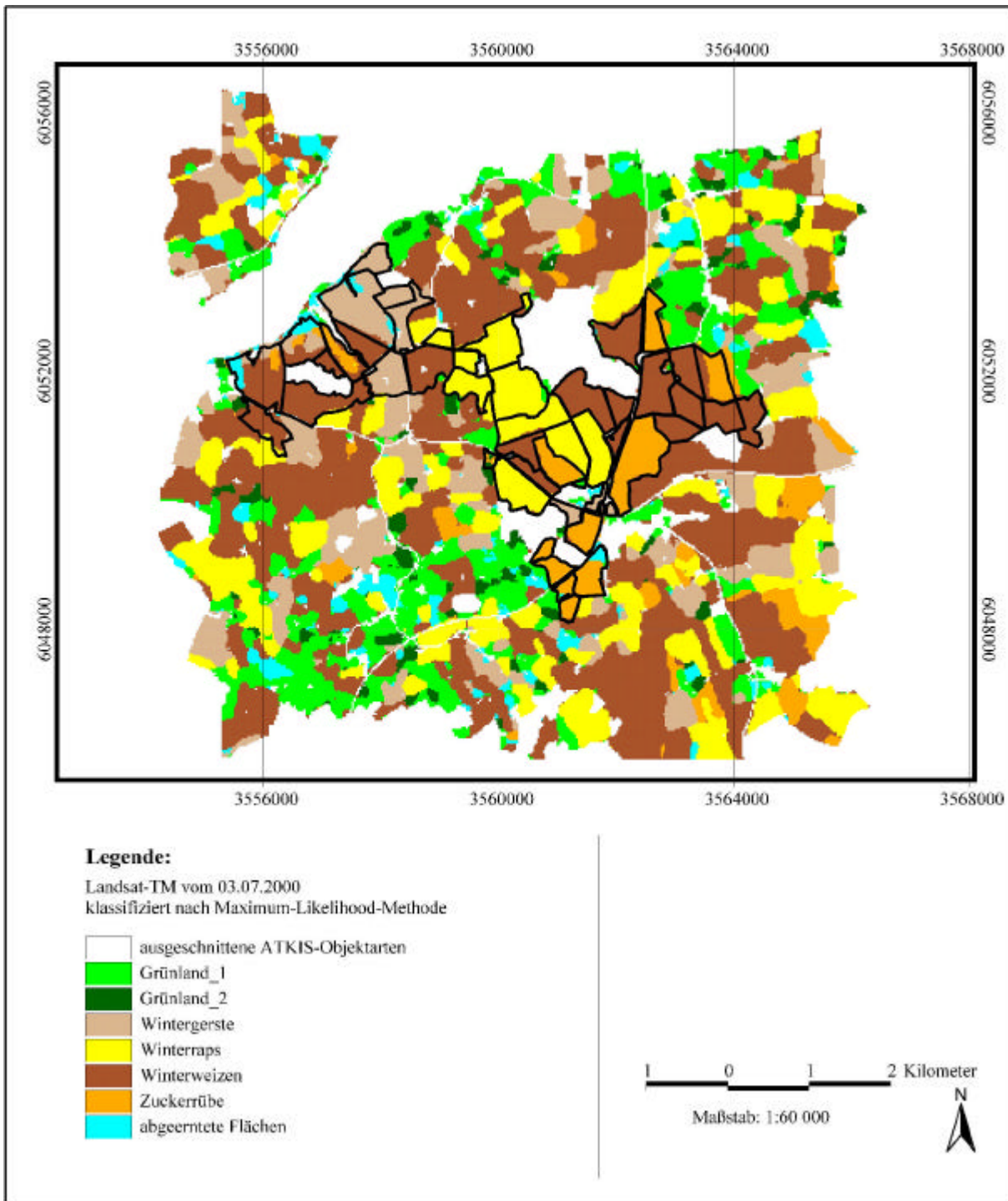


Abb. 3.3-25: Ergebnis der multispektralen Landnutzungsklassifikation des Landsat-TM Datensatzes vom 03.07.2000 mit dem Schwerpunkt landwirtschaftlicher Kulturen (Klimek, 2001)

Es bleibt festzuhalten, dass:

- das Abreifezeitfenster, insbesondere in dem maritim geprägten Untersuchungsgebiet mit häufiger Wolkenbedeckung zu kurz ist, um von dem Satellitensensor Landsat TM aufgezeichnet zu werden und

- durch den Trockenstress im Jahr 2000 konnten für einzelne Schläge signifikante Beziehungen zu den vorliegenden Bodenkarten (Reichsbodenschätzung) sowie zu den kartierten Erträgen ermittelt werden.

3.3.5.8 Seneszenzanalyse Schlag KSG111-4 - Hydro-N-Sensor im Spektralmodus

Der Schlag KSG 111-4 wurde während der Abreifephase 03.07.01 – 03.08.01 (EC 75 – 92) insgesamt sieben Mal mit dem Hydro N-Sensor im Spektralmodus entlang der Fahrgassen befahren. Die im Sekundenintervall aufgezeichneten Werte sind mit geostatistischen Verfahren auf ein 5 m Raster interpoliert worden. Damit konnte die Anisotropie in Fahrgassenrichtung berücksichtigt werden. Am 04.07.01 ist an 10 Punkten die Biomasse und die Bestandeshöhe bestimmt worden. Vor der Ernte wurde am 03.08.01 an 16 ausgewählten Punkten Handernten durchgeführt. Anhand der Handernten sind zur Übersichtlichkeit aus den NDVI-Werten fünf charakteristische Kurven des Abreifeverhaltens ermittelt worden, siehe Abb. 3.3-26 und Tab. 3.3-8.

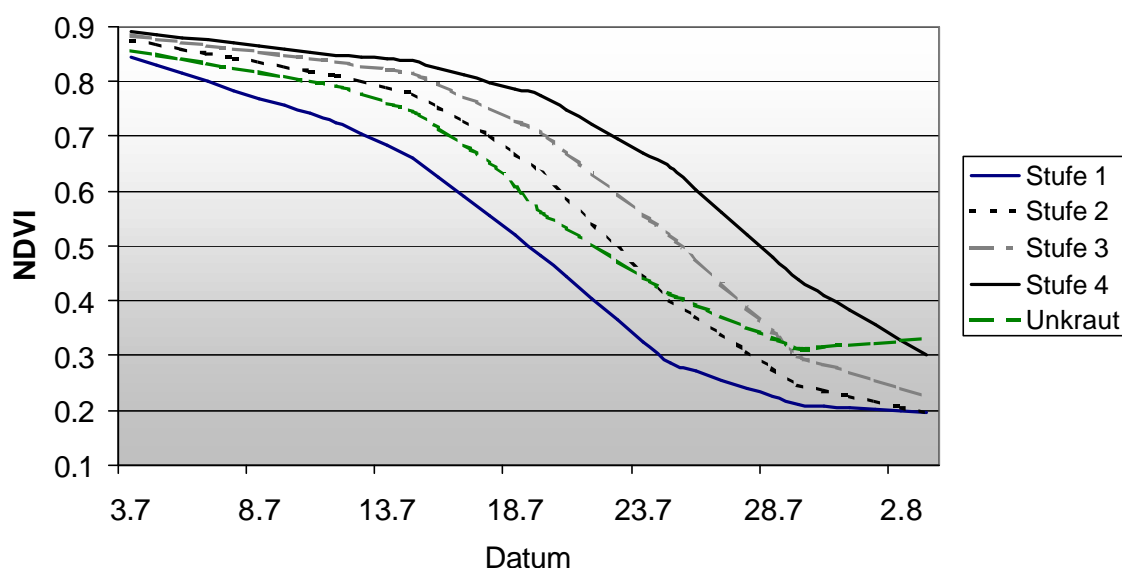


Abb. 3.3-26: Charakteristische Seneszenzverläufe, NDVI Hydro-N Sensor, Schlag KSG 111-4, 2001 (Winterweizen)

Tab. 3.3-8: Pflanzenbauliche Charakterisierung der Seneszenzstufen anhand der Handernte, 03.08.2001

	Abreife	Höhe [cm]	Biomasse [kg]	Ertrag [dt/ha]	Kornanteil [%]	Protein [%]
Stufe 1	Früh	57 – 65	1,4 – 1,6	61 – 68	40 – 45	12 – 13
Stufe 2	Normal	76 – 81	2,2 – 3,2	89 – 112	28 – 39	14 – 15
Stufe 3	Spät	78 – 84	2,5 – 3,6	76 – 98	26 – 30	16
Stufe 4	Sehr spät	84 – 87	3,6 – 4,3	76 – 101	20 – 24	16 – 17
Unkraut	Früh	67	1,5	57	38	13

Anhand der Abb. 3.3-26 wird deutlich, dass der Entwicklungsunterschied zwischen den früh und den spät abreifenden Beständen etwa 8 – 10 Tagen beträgt.

Zur Übertragung der anhand der Handernten gebildeten Stufen in die Fläche wurde eine überwachte multitemporale Klassifikation der NDVI-Datensätze, siehe Abb. 3.3-27, durchgeführt. Da zwischen Stufe 1 und 2 eine Lücke besteht, die nicht durch Handerntepunkte abgedeckt wurde, ist zusätzlich eine Stufe 1.5 erstellt worden. Darüber hinaus musste noch der Tatsache Rechnung getragen werden, dass die Verunkrautung nicht überall so ausgeprägt ist, wie bei der dargestellten Kurve.

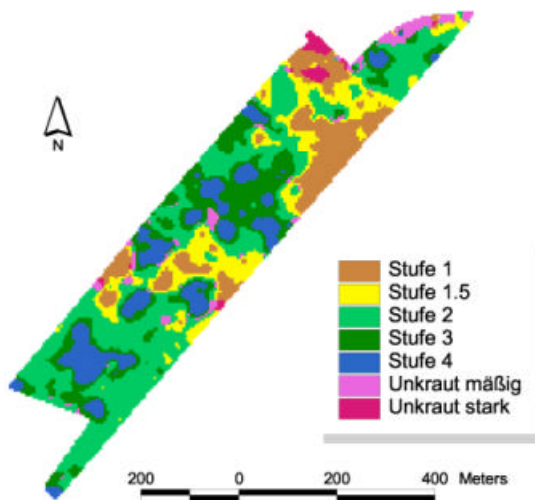


Abb. 3.3-27: Multitemporale Senseszenz Klassifikation Schlag KSG 111-4

Deshalb ist eine weitere Klasse mit geringer Verunkrautung eingeführt worden. Die Ertragswirksamkeit der räumlichen im Luftbild bzw. mit dem NDVI des Hydro-N Sensors sichtbaren Muster der Biomasse hängt maßgeblich von der Ertragsstruktur ab. Hier hat sich 2001 für die untersuchten Winterweizenschläge in Kassow (106, 111-2, 111-4) gezeigt, dass aufgrund der sehr variablen Verhältnisse zwischen Kornenertrag und Biomasse (20 – 45 % !!) die Kornenerträge nur eingeschränkt mit den durch die FE-Sensoren gemessenen Mustern übereinstimmen ($R^2 < 0,56$). Die Ursache liegt vor allem an der teilweise feuchten Witterung, die dazu führte, dass der Winterweizen auf den Standorten mit

einem hohen Wasserangebot die Anzahl der Triebe nicht ausreichend reduziert hat und somit viele kleine Ähren (max. 870/m²) mit einer hohen Biomasse, jedoch einem insgesamt geringen Einzelährengewicht gebildet wurden. Dies wird z.B. durch die Tatsache gestützt, dass die bei der Handernte auf Schlag 111-4 gemessene Kornfeuchte mit einem $R^2 = 0,92$ mit dem Kornanteil korreliert.

Im Gegensatz dazu weist der Winterroggen auf dem Schlag 109 einen nahezu konstanten Kornanteil von 22 - 24 % auf. Das bedeutet, dass die Biomasse mit einem $R^2 = 0,95$ und der Kornenertrag mit einem $R^2 = 0,91$ durch den NDVI des Hydro-N-Sensors erfasst werden konnten.

Die verlängerte Phase der Milch- und Gelbreife auf den feuchten Standorten der der Assimilateinlagerung des Stickstoffs in das Korn, was die hohen Protein-Gehalte (> 16%) des E-Weizens auf den feuchten Standorten eindrücklich beweisen, die mit $R^2 = 0,79$ mit der Kornfeuchte korrelieren.

Ausgehend von den zum Beginn und zum Ende der Seneszenz erhobenen Biomassschnitten ist das „Window of Opportunity“, d.h. der günstige Zeitraum zur Erfassung der räumlichen Heterogenität durch einen FE-Sensor ermittelt worden. Generell ist zu sagen, dass die Bestimmtheitsmaße mit zunehmender Abreife abnehmen ($R^2 = 0,96 - 0,5$), da sich mit der Abreife die Wassergehalte und Kornanteile der Pflanzen zunehmend unterscheiden. Außerdem können z.B. Spätverunkrautung und Lagergetreide die NDVI-Werte negativ beeinflussen. Der günstige Zeitraum mit

einem $R^2 > 0,8$ erstreckt sich über ca. 3 Wochen vom 3.7. – 23.7.2001, also bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Unterschiede des NDVI innerhalb des Schlags abnehmen (vgl. Abb. 3.3-26).

3.3.5.9 Sensorvergleich

Im Rahmen eines Intensivmessprogramms wurde 2001 für drei ausgewählte Winterweizenschläge (111-4 in Kassow, Asphaltwerk in Queis und Kiesberg in Wulfen) durch das ATB Potsdam-Bornim an ca. 15 – 20 Stellen pro Schlag, die durch die beteiligten Bodenkundler des TP II-1a vorgegeben waren, mehrere Bestandesparameter ermittelt. Die Ermittlung der Frischmasse erfolgte durch Ausmähen eines 2*2 m Areal. Im angrenzenden Umfeld wurden weitere Bestandesparameter wie z.B. Pflanzenhöhe, Blattflächenindex, Anzahl ährentragender Halme und der Krankheitsbefall durch einen Experten zu drei verschiedenen Terminen bestimmt. Der Blattflächenindex wurde mit einem tragbaren Handgerät, einem Sun Scan®, erfasst.

3.3.5.9.1 Terrestrische traktorgetragene Sensoren

Zur Erfassung der Pflanzenvitalität, mit einem speziellen Augenmerk auf die Stickstoffversorgung, sind mehrere verschiedene traktorbasierte Verfahren entwickelt worden, die auf unterschiedlichen optischen bzw. mechanischen Prinzipien beruhen:

Der **Hydro Agri N-Sensor**, der mit einem Spektrometer das Reflexionsverhalten der Pflanzen im sichtbaren Licht und im NIR in der Umgebung des Schleppers erfasst. Durch einen nach oben gerichteten Referenzsensor werden unterschiedliche Lichtverhältnisse kompensiert, Wollring und Reusch, 1999. Der Hydro-N-Sensor kann zusätzlich im so genannten Spektralmodus genutzt werden, der für *pre agro* 2001 extra freigeschaltet wurde. In dem Spektralmodus können die Reflexionswerte von fünf 10 nm breiten und frei definierbaren Wellenlängenbereichen aufgezeichnet werden. Um den Hauptwendepunkt abzubilden und weitere Indizes zu generieren wurden die Wellenlängen 550 nm, 670 nm, 700 nm, 740 nm und 780 nm ausgewählt. Als Vegetationsindex wurde der NDVI gewählt, da während des Beobachtungszeitraums der Pflanzenbedeckungsgrad nahezu 100 % betrug.

Ein weiteres Verfahren, das in erster Linie die Bestandesdichte mechanisch über dessen Widerstand misst und vom TP III-5 eingesetzt wurde, ist das am ATB Potsdam-Bornim entwickelte **Pendulum-Meter**, Hammen und Ehlert, 1999. Dabei wird ein an einem Potentiometer aufgehängtes Pendel durch den Widerstand des Getreidebestandes in den Fahrgassen ausgelenkt. Das Pendel wird entweder auf dem Traktor montiert oder für experimentelle Fragestellungen auf einem Hege-Geräteträger. Die Auslenkung korreliert eng mit der Bestandesdichte und dem Blattflächenindex. Für eine flächenhafte Erfassung zeichnet das Gerät die Position und die Pendelauslenkung mit 1 Hz auf. Das Fahrzeug sollte dabei mit einer möglichst gleichmäßigen Geschwindigkeit fahren, um ungewünschte Auslenkungen zu vermeiden.

Der Vollständigkeit halber seien die **Laserfluoreszenzsensoren** der DLR / Fa. Fritzmeier bzw. Planto GmbH / Amazonen Werke erwähnt, die einen Niedrigenergielaser benutzen, um Pflanzenteile zur Fluoreszenz anzuregen, Günther et al., 1999. Mit diesem aktiven Sensor ist auch ein tageslichtunabhängiger Betrieb möglich.

3.3.5.9.2 Flugzeuggetragene Sensoren

Als flugzeuggetragene Sensoren sind einerseits das NIR-System des TP II-4 der Firma Agrosat und andererseits PFIFF vom Institut für Geodäsie und Geoinformatik zum Einsatz gekommen. Eine exakt zeitgleiche Aufnahme der Luftbilder war nicht möglich, aber die Bilder konnten mit wenigen Tagen Unterschied aufgenommen werden, vgl. Tab. 3.3-.

3.3.5.9.3 Satellitengetragene Sensoren

Zur Untersuchung der Vegetationsdynamik innerhalb einer Vegetationsperiode ist eine Landsat-ETM Satellitenbildserie, bestehend aus 12 Miniszene vom 20.2. – 20.8.2001 ausgewertet worden. Der Ausschnitt der Miniszene wurde so gewählt, dass alle *pre agro* Projektschläge in Sachsen-Anhalt ausgewertet werden können, siehe Abb. 3.3-28. Von den 12 Szenen, die in einem zeitlichen Intervall von 16 Tagen aufgezeichnet wurden, sind aufgrund der Bewölkung nur 5 Szenen im Zeitraum vom 13.5. - 3.8. – teilweise mit Einschränkungen – verwertbar. Damit konnte leider keine Aufnahme während der Bestockungs- bzw. der Schoßphase vor dem Fahnenblattstadium ausgewertet werden. Die Vorverarbeitung der Satellitenbildszenen umfasste eine Atmosphärenkorrektur mit ATCOR 1.8 sowie eine subpixelgenaue Geokodierung auf die TK 25. Bei der Atmosphärenkorrektur werden die Grauwerte des Sensors unter Berücksichtigung der speziellen atmosphärischen Bedingungen in absolute Reflexionswerte umgerechnet. Dabei wird der Atmosphäreneinfluss „weggerechnet“ und eine quasi dunstfreie Aufnahme mit einem höheren Kontrast erzeugt, Abb. 3.3-29.

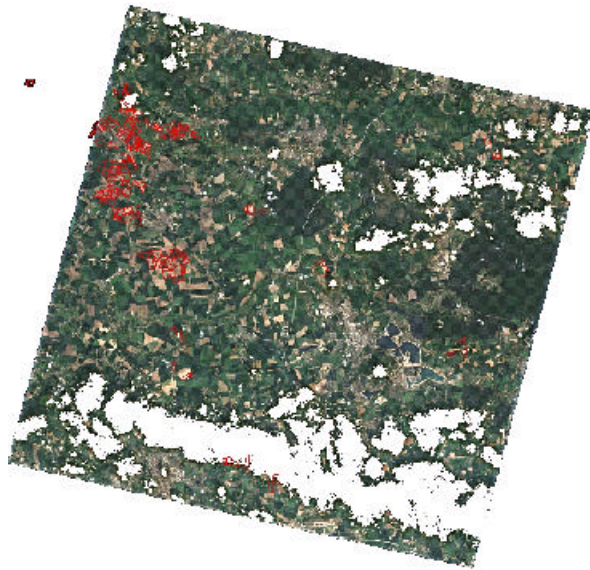


Abb. 3.3-28: Atmosphärisch und geometrisch korrigierte Landsat ETM-Miniszene vom 29.05.2001 mit überlagerten Schlaggrenzen der *pre agro*-Betriebe in Sachsen-Anhalt



Abb. 3.3-29: Effekt der Atmosphärenkorrektur, Szene 29.5.2001, RGB-Darstellung

Bei einem Wolkenanteil von 40 % und mehr stoßen die automatischen Routinen von ATCOR zur Bestimmung der Sichtweite bzw. des Dunstes an ihre Grenzen, was den manuellen Arbeitsaufwand stark erhöht. Auf der Grundlage atmosphärenkorrigierter Aufnahmen ist ein direkter multitemporaler Vergleich der Grauwerte einzelner Kanäle bzw. abgeleiteter Indizes zwischen den Aufnahmen möglich.

3.3.5.9.4 Sensorvergleich am Beispielschlag Kiesberg

Im Folgenden soll anhand des Schlags Kiesberg (23,95 ha) der Wimex AG ein Vergleich zwischen den verschiedenen terrestrischen, flugzeug- und satellitengestützten Sensoren vorgenommen werden. Der Schlag weist eine große bodenbürtige Heterogenität auf (Ackerzahlen 32 - 82). Die Bestandesparameter (Biomasse, Höhe, LAI) weisen untereinander hohe lineare Korrelationen auf. So beträgt am 17.05.01 für Biomasse zu LAI das lineare Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,78$ sowie Bestandeshöhe zu LAI $R^2 = 0,67$ und Biomasse zu Höhe $R^2 = 0,77$.

Aufgrund von Witterungseinflüssen konnten die flugzeuggetragenen Fernerkundungsaufnahmen nicht zu allen drei Terminen realisiert werden. In der nachfolgenden Tabelle sind die statistischen Zusammenhänge zwischen den gemessenen Bestandesparametern und den spektralen bzw. mechanischen Sensorwerten zusammengefasst. Da die Aufnahmezeitpunkte und die Vorverarbeitung der Daten einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben, sind Besonderheiten extra aufgeführt.

Tab. 3.3-9: Bestimmtheitsmaß (R^2) für die Anpassung eines Polynoms 2. Grades zwischen den gemessenen Bestandesparametern ($n = 19$) (y-Variable) und den spektralen Messwerten sowie daraus abgeleiteten Indizes (x-Variable)

Termin	EC	Merkmal	Pendel-Winkel ¹	N-Sensor ²		PFIFF ³ VARI	NIR	Landsat-TM ⁵	
				NDVI	REIP			NDVI	TM 4
17.05.01	37	FM	0,61	0,06*	0,32	0,64	0,74	0,06*	0,64
		LAI	0,69	0,17*	0,51	0,72	0,76	0,18*	0,54
		Höhe	0,72	0,07*	0,21	0,54	0,43	0,08*	0,62
08.06.01	55	LAI	0,69				0,68 ⁴	0,09*	0,48
		Höhe	0,77				0,56 ⁴	0,03*	0,38
28.06.01	77	LAI	0,73	0,69	0,72		0,40 ⁴	0,56	0,41
		Höhe	0,73	0,77	0,75		0,26 ⁴	0,66	0,26
19.08.01		Ertrag	0,65	0,80	0,72		0,11 ⁴	0,73	0,68

* nicht signifikant

¹ Termine: 17.05.01, 08.06.01, 28.06.01, geostatistisch interpoliertes Raster mit 9 m Gitterweite

² Termine: 22.05.01, 29.06.01, geostatistisch interpoliertes Raster mit 10 m Gitterweite

³ Termine: 23.05.01, 26.07.01, Bodenauflösung 0.9 m, da die ausgemähten 2 * 2 m großen Messpunkte zur Biomasse auf den Luftbildern nicht mehr gemessen werden konnte, wurde in der direkten Umgebung der Messpunkte ein Polygon mit ähnlichen spektralen Charakteristika über ein Region Growing-Ansatz definiert, um die Mikrovarianz benachbarter Pixel zu reduzieren.

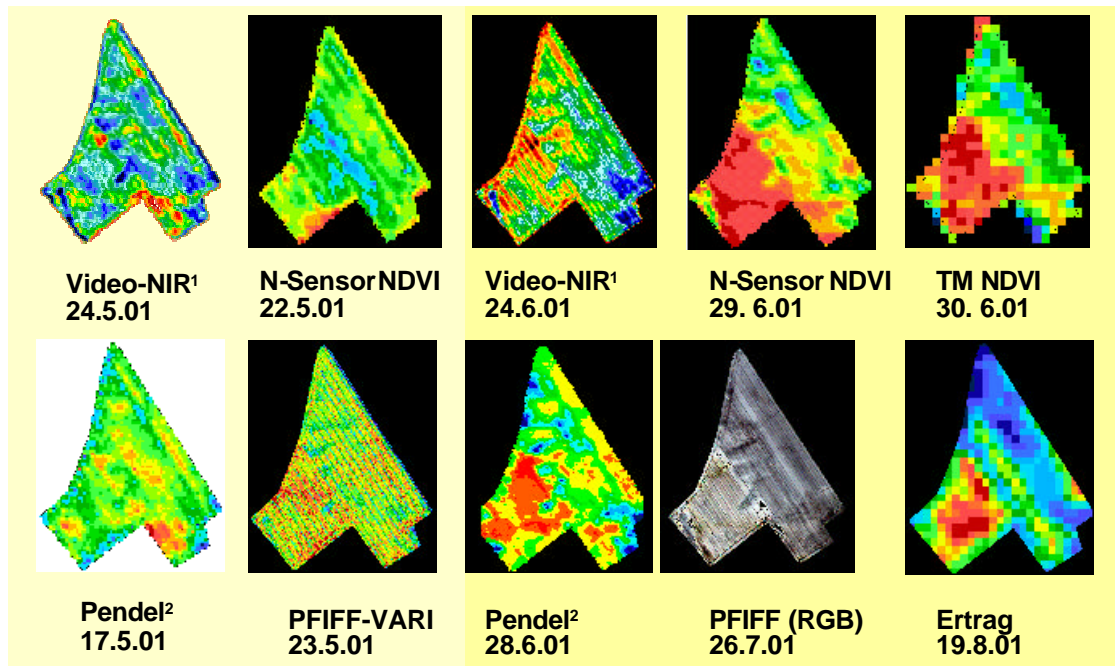
⁴ Termine: 24.05.01, 24.06.01, Bodenauflösung 3,0 m bzw. 2,5 m, zwischen der NIR-Aufnahme vom 24.06.01 und der LAI-Messung vom 28.06.01 hat offensichtlich die Seneszenz begonnen, was dazu führt, dass die Reflexionswerte eine nur geringe Aussagekraft für die vier Tage später stattgefunden Bonitur besitzen.

⁵ Termine: 13.05.01, 29.05.01, 14.06.01, 30.06.01, 02.08.01

3.3.5.9.5 Vergleich Landsat TM und Hydro-N Sensor im Spektralmodus

Mit dem Erscheinen der letzten Blätter (EC 34 – 37) wird bei Winterweizen nahezu das gesamte Licht im roten Wellenlängenbereich absorbiert. Die geringen Reflexionswerte von 2 – 4 % im roten Wellenlängenbereich sind rauschbehaftet und werden bei der atmosphärenkorrigierten Landsat TM Szene nur durch maximal 6 verschiedene Grauwerte abgebildet. Die starke Grenzflächenreflexion im NIR führt hingegen zu Reflexionen von 43 – 58 %, was einem Umfang von 45 Grauwerten der atmosphärenkorrigierten Landsat TM-Szene entspricht. Als Konsequenz sind bei der Ableitung eines Vegetationsindexes wie dem NDVI die ohnehin geringen Unterschiede wesentlich auf das Rauschen im roten Wellenlängenbereich zurückzuführen. Deshalb können während dieser Phase einkanalige Korrelationen von NIR bzw. MIR zu den gemessenen Bestandesparametern sinnvoll sein, um die räumliche Variabilität des Bestandes abzubilden. Beispielsweise ergeben sich für den Schlag Kiesberg für die Landsat TM-Aufnahme vom 13.5.01 lineare Korrelationen von NIR (= TM-Kanal 4) zur Biomasse von $R^2 = 0,67$, bzw. NIR zur Höhe von $R^2 = 0,64$. Der NDVI hingegen ist zu den Bestandesparametern vollständig dekorreliert ($R^2 < 0,1$). Gleiches gilt z.B. für den NDVI des Hydro N-Sensors.

In der Abreifephase kommen die Vegetationsindizes aus der Sättigung, da die Reflexion im roten Wellenlängenbereich wieder zunimmt und gleichzeitig die Grenzflächenreflexion im NIR abnimmt. Die relativ niedrigen Korrelationen der Landsat TM-Daten zu den Ground Truth-Daten ist nicht weiter verwunderlich, da selbst Lageungenauigkeiten < 1 Pixel zu großen Unterschieden in den Korrelationskoeffizienten führen können. Deshalb ist eine Korrelation mit anderen flächenhaften Daten aussagekräftiger, wie der rein optische Vergleich mit dem N-Sensor NDVI zeigt, Abb. 3.3-30.



¹ Agro-Sat GmbH, ² ATB Potsdam-Bornim

Abb. 3.3-30: Sensorvergleich Schlag Kiesberg 2001

Um die genannten Lageungenauigkeiten sowie die Streuung durch Mischsignaturen einzelner Pixel zu reduzieren, werden für die Korrelation des Hydro-N NDVI's mit dem Landsat TM NDVI auf ein 1 ha Raster interpoliert, um ein Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,8$ zu erzielen. Während der Reifephase (EC 71 - EC 85) können Fernerkundungsaufnahmen bzw. daraus abgeleitete Vegetationsindizes mit großer Zuverlässigkeit auch zur Ertragsschätzung verwendet werden, wie z.B. Johnen, 2001, Klimek, 2001 und Selige und Schmidhalter, 2001 für verschiedene Sensoren und Regionen in der Bundesrepublik gezeigt haben. Zur Ermittlung des Bestimmtheitsmaßes des NDVI zum Ertrag ist die auf ein 25 m Raster interpolierte Ertragskartierung des Mähdreschers analog zur oben beschriebenen Vorgehensweise auf ein 1 ha Raster vergrößert worden. Dabei ergab sich eine lineare Beziehung mit $R^2 = 0,67$ ($n = 32$) für Landsat TM sowie ein $R^2 = 0,75$ für den NDVI des Hydro-N Sensors. Bei der Güte der Bestimmtheitsmaße sind die vielfältigen Probleme bei den Ertragsmesssystemen zu berücksichtigen, vgl. z.B. Ebert und Grenzdörffer, 2001. Zudem spiegelt der NDVI in erster Linie die Biomasse wieder. Diese ist jedoch nicht zwangsläufig mit dem Kornertrag gleichzusetzen, wie das aus den Handernten berechnete Verhältnis zwischen Biomasse und Kornertrag (53 – 62 %) zeigt.

3.3.5.9.6 Schlussfolgerungen Sensorvergleich

Eine sinnvolle Korrelation zwischen einem „klassischen“ Vegetationsindex (NDVI, SAVI, ...), optischer Sensoren und dem LAI sowie anderen Bestandesparametern (Biomasse, Bestandeshöhe) ist für Winterweizen nach dem Erscheinen des letzten Blattes (EC 37) bis zur Kornbildungsphase EC 71 nicht möglich, da die Indizes während dieser Periode ihr Maximum erreicht haben. Dabei spielt es grundsätzlich keine Rolle, ob es sich um einen breitbandigen oder schmalbandigen Sensor handelt.

Eine Alternative können einkanalige Korrelationen im NIR bzw. MIR darstellen, denn die NIR-Reflexion nimmt auch bei einem LAI > 3 noch geringfügig zu. Dies gilt für den Hydro-N Sensor nur unter der Voraussetzung, dass die Aufnahme bei wolkenlosem Himmel erfolgt, da sich ansonsten bei variablen Einstrahlungsbedingungen das Reflexionsverhalten der Pflanzen während einer Überfahrt verändert.

Während der Seneszenzphase liefern alle untersuchten Sensoren akzeptable Korrelationen zu den Bestandesparametern und dem Ertrag, d.h. die Wahl des Sensors (N-Sensor, Pendel, NIR-Video, Luftbild, Satellit ...) ist mehr oder weniger egal, vgl. Tab. 3.3-9. Selbstverständlich ist das Bestimmtheitsmaß von der Bodenauflösung abhängig. Aufgrund der Sensorcharakteristika sowie der geometrischen Vorverarbeitung der Landsat TM Szenen werden ab einer Rastergröße von 1 ha akzeptable R^2 (> 0,7) zur Ertragskartierung, dem Hydro-N-Sensor bzw. dem Pendel ermittelt.

Im wesentlichen ergeben sich für die spektralen Sensoren zwei größere Zeitfenster zur Erfassung der Bestandesheterogenität. Im Gegensatz dazu kann der mechanische Pendelsensor über einen zusammenhängenden Zeitraum zuverlässig die Bestandesheterogenität abbilden, Abb. 3.3-31. Die Länge der Zeitfenster hängt von den spektralen Eigenschaften des Sensors ab, wobei insbesondere bei dem traktorbasierten Hydro-N-System die schräg blickende Beobachtungsgeometrie sowie die schmalbandige Abtastung einen frühen Beobachtungszeitraum zulässt.

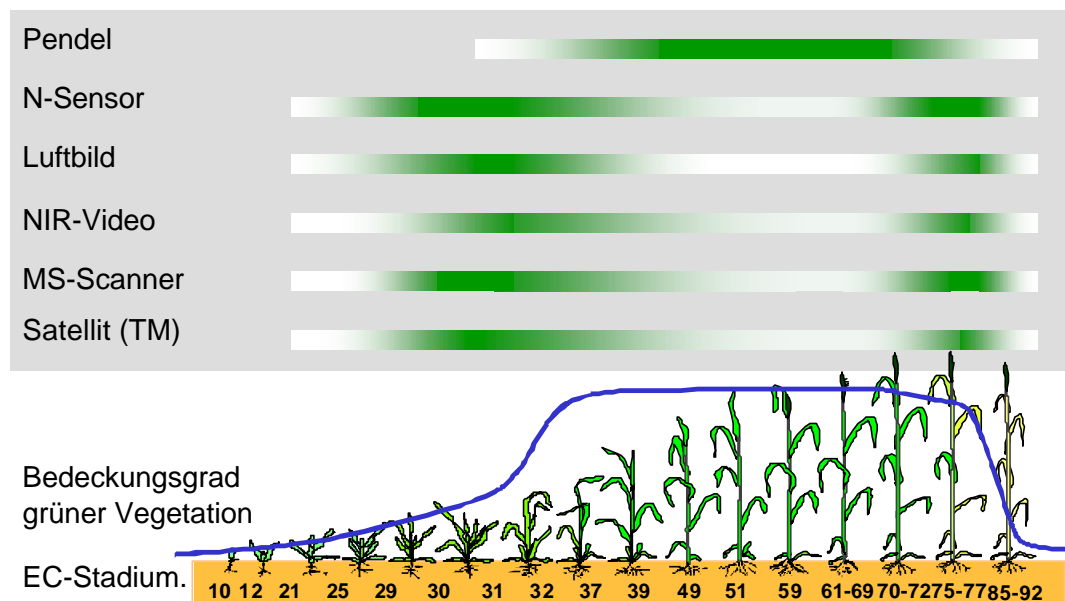


Abb. 3.3-31: Zeitfenster verschiedener FE-Sensoren zur Erfassung der Bestandesheterogenität von Winterweizen

Die räumliche Heterogenität der Bestandesparameter Höhe und Biomasse lässt sich durch alle in dem Vergleich eingesetzten Sensoren sehr gut erfassen. Obgleich der LAI als Eingangsparameter in verschiedenen Wachstumsmodellen verwendet wird, so ist seine Messung im Feld aufwändig und insbesondere bei Beständen mit unregelmäßiger Standraumausnutzung fehlerbehaftet. Die Korrelationen des LAI zu den Indizes fernerkundlicher Sensoren sind generell schlechter als zur Biomasse und zur Bestandeshöhe.

3.3.6 Kooperation mit anderen Teilprojekten

Die Luftbildinformationen sind als aktuelle Grundlageninformationen in mehreren Teilprojekten erfolgreich zum Einsatz gekommen. Auf dem Standort Kassow sind Frühjahrsluftbilder zur Auswertung der Bodenbeprobung von TP II-1a eingesetzt worden. Im TP II-1b dienen die Luftbilder zur visuellen Kontrolle der aus den Geländemodellen abgeleiteten Parametern.

Die Luftbildaufnahmen bieten den anderen TP's in erster Linie qualitative Informationen zur Boden- und Bestandesheterogenität, die durch die intuitive Interpretierbarkeit der Echtfarbenaufnahmen für die jeweiligen Forschungen in unterschiedlichster Weise genutzt werden, z.B. als a priori Information zur Planung von Bonituren und Beprobungen, als Validierungsinformation und Dokumentationsmedium bei der Kontrolle von (einheitlichen) und teilflächenspezifischen Modulen und Bewirtschaftungsstrategien sowie als zusätzliche Datenquelle zur Analyse des Einflusses der Witterung und unvorhergesehener Ereignisse (Vernässung, Verunkrautung, Lagergetreide, ...). Diese Informationen und Möglichkeiten werden von vielen Projektpartnern des *pre agro* Projektes verwendet und im Folgenden exemplarisch vorgestellt.

Mit Hilfe des Luftbildes können Bonituren der aktuellen Bestandessituationen durch Methoden der Fernerkundung (Luftbildinterpretation und digitale Bildverarbeitungsmethoden) verbessert bzw. der Aufwand stark vereinfacht werden. Hierzu werden gemeinsam mit Teilprojekt III-4 methodische Untersuchungen vorzunehmen sein. Weiterhin werden Luftbilder eingesetzt, um die Festlegung von Zielbereichen für Naturschutzziele in Ackerflächen zu objektiveren TP II-3b Naturschutzziele und - in beschränktem Umfang - zu automatisieren. In diesem Prozess werden und sollen für ganze Luftbildserien eines größeren Landschaftsraumes eine automatische Segmentierung und Klassifizierung durchgeführt werden. Ziel ist es, bestimmte Biotoptypen zu detektieren, die nicht aus vorliegenden amtlichen Daten (wie z.B. ATKIS) hervorgehen. Hierbei gilt das aktuelle Luftbild, welches sich nicht ausschließlich auf den Schlag bezieht, als unentbehrliche Informationsquelle. Im Teilprojekt III-3 werden Luftbilder zur Erstellung von Karten zur ortsspezifischen Bodenbearbeitung genutzt. Vorwiegend wird zur Optimierung der Bodenbearbeitung und Bestellung zwischen Feucht- und Trockenbereichen differenziert. Schließlich nutzt Teilprojekt II-1b Luftbilder zur Validierung des Topographical Wetness Index (TWI) und anderer Reliefparameter.

3.3.7 Ausblick

Fernerkundungsdaten sind nur Momentaufnahmen der Pflanzenentwicklung mit einer beschränkten Halbwertszeit. Die dynamischen Elemente verfügbarer Pflanzenwachstumsmodelle basieren üblicherweise auf agrarmeteorologischen Zusammenhängen. Eine Kombination aktueller Fernerkundungsdaten zur Anpassung der Modelle an die laufende Pflanzenentwicklung ist ein logischer Schritt, dem in zukünftigen Arbeiten verstärkt nachgegangen werden sollte.

3.3.8 Literatur

3.3.8.1 Verwendete Literatur

- Ackermann, F. (1997): Geo-Kodierung ohne Passpunkte.- GIS 2/97: S. 28-32.
- European Commission, JRC, CEO [Hrsg.] (1998): Customer Segment Workshops – Agribusiness.- Vol. I - Final Report, Contract Number 13320-97-10 F1ED ISP GB: 77 S.
- European Commission, JRC, CEO [Hrsg.] (1998): Customer Segment Workshops – Agribusiness.- Vol. II - Annexes, Contract Number 13320-97-10 F1ED ISP GB: 78 S.
- Gabriel, D. und Havaresch, E. (1999): Operationelle Satellitenfernerkundung für Precision Farming.- In: Bill, R., Grenzdörffer, G. und Schmidt, F. [Hrsg.]: Sensordysteme im Precision Farming.- Interner Bericht Heft Nr. 12 Institut für Geodäsie und Geoinformatik: S. 1 - 10; Rostock.
- Griepentrog, H.-W. (1999): Ertragsermittlung mit Mähdrescher.- KTBL Arbeitspapier 264, Erfassung der kleinräumigen Heterogenität: S. 68-77.
- Günther, K.-P., Dahn, H.G. und Lüdecker, W. (1999): Laser-induced-fluorescence a new method for “precision farming”.- In: Bill, R., Grenzdörffer, G. und Schmidt, F. [Hrsg.]: Sensordysteme im Precision Farming.- Interner Bericht Heft Nr. 12 Institut für Geodäsie und Geoinformatik: S. 133 - 144; Rostock.
- Hammen, V. und Ehlert, D. (1999): The pendulum-meter: A new on-line sensor for determining grass yield for site specific farming.- In: Stafford, J.V. [Hrsg.]: Precision Agriculture ‘99.- Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense 11.-15.7.1999, Part I: S. 689 - 697; Bioß Scientific Publishers.
- Johnen, T. (2001): Fernerkundungs- und GIS-gestützte Untersuchungen zur teilflächenspezifischen Ertragsabschätzung von Winterweizen in Mecklenburg 83 S.- Unveröff. Dipl. Arb., Universität Rostock.
- Klimek, S. (2001): GIS-gestützte multitemporale Auswertung von Landsat-TM-Szenen für Anwendungen im Precision Farming.- 87 S., Unveröff. Dipl. Arb., Universität Rostock.
- Moran, M.S., Inoue, Y., und Barnes, E.M. (1997): Opportunities and limitations for image based remote sensing in precision crop management.- Remote Sensing of Environment **61**: S. 319 - 346.
- Schwiertz, C. (1994): Experimente zur GPS-gestützten Aerotriangulation unter besonderer Berücksichtigung systematischer Einflüsse.- Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen Universität der Bundeswehr München **48**: 189 S.; Neubiberg.
- Selige, Th. und Schmidhalter, U. (2001): Site Specific Soil Resource mapping using Remote Sensing.- In: G. Grenier and S. Blackmore, Hrsg.: Third European Conference on Precision Agriculture.- Montpellier, France, Vol. 1: S. 307-311.

- Shortis, M.R., Robson, R. und Beyer, H.A. (1998): Principal point behaviour and calibration parameter models for Kodak DCS cameras.- *Photogrammetric Record* **16** (92), 10/98: S. 165 – 186.
- Steven, M.D. und Millar, C. (1997): Satellite Monitoring for Precision Farm Decision Support.- In: Stafford, J.V. [Hrsg.]: *Precision Agriculture '97.- Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture*, Warwick 8.-10.9.1997, Vol. II: S. 697 - 704; Bioß Scientific Publishers.
- Toth, C. (1999): Experiences with frame CCD arrays and direct georeferencing.- In: Fritsch, D. und Spiller, R. [Hrsg.]: *Photogrammetric Week '99.*: S. 95 – 108; Wichmann Verlag.
- Wollring, J. und Reusch, S. (1999): Variable N-Düngung mit Hilfe eines Online Sensors.- In: Bill, R., Grenzdörffer, G. und Schmidt, F. [Hrsg.]: *Sensorsysteme im Precision Farming.- Interner Bericht Heft Nr. 12 Institut für Geodäsie und Geoinformatik*: S. 93 - 104; Rostock.

3.3.8.2 aus Projektarbeit entstandene eigene Publikationen

1999

- Bill, R., Grenzdörffer, G. und Schmidt, F. [Hrsg.] (1999): *Sensorsysteme im Precision Farming.- Interner Bericht Heft Nr. 12 Institut für Geodäsie und Geoinformatik*: 190 S.; Rostock.
- Bill, R. (1999): Geodaten schaffen Raumbezug.- *dlz Agrarmagazin Sonderheft 10 "Ackerbau per Satellit"*: S. 66 – 69.
- Grenzdörffer, G. (1999a): Digitale low-cost Fernerkundung für Precision Farming.- 2. IuK Tagung Mecklenburg-Vorpommern 17.-19.6.1999. Tagungsband zum Workshop GIS und GPS in der Landwirtschaft. 10 S.
- Grenzdörffer, G. (1999b): Dokumentation und Analyse kleinräumiger Heterogenität mit Fernerkundung und GIS.- *KTBL Arbeitspapier 264*, S. 93 – 105.
- Grenzdörffer, G. (1999c): Von der Vogelperspektive aus gesehen - Fernerkundung zeigt Unterschiede in Boden und Bestand auf.- *dlz Agrarmagazin Sonderheft 10 "Ackerbau per Satellit"*: S. 62 - 65.
- Grenzdörffer, G. und Foy, T. (1999): Digitales low-cost Fernerkundungssystem für Precision Farming.- In: Bill, R., Grenzdörffer, G. und Schmidt, F. [Hrsg.] (1999): *Sensorsysteme im Precision Farming.- Interner Bericht Heft Nr. 12 Institut für Geodäsie und Geoinformatik*: S. 23 – 36; Rostock.

2000

- Grenzdörffer, G. (2000a): Anforderungen an ein GIS für Precision Farming.- 19. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung DGPF in Essen (= Publikationen der DGPF Band 8). S. 185 – 192.
- Grenzdörffer, G. (2000b): GIS for Precision Farming - Data, requirements and current status.- *GIM International* 8/2000: S. 15 – 17.
- Grenzdörffer, G. und Foy, T. (2000): Digitales low-cost Fernerkundungssystem für Precision Farming.- 19. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung DGPF in Essen (= Publikationen der DGPF Band 8). S. 87 – 94.
- Grenzdörffer, G., Foy, T. und Irrgang, A. (2000a): Low-cost Fernerkundung für Precision Farming – Anwendungsmöglichkeiten und Systementwicklung.- anlässlich Tagung: "Umweltgerechte Nutzung und nachhaltige Entwicklung ländlicher Räume 11./12.11.99" (= Rostocker Agrar- und Umweltwissenschaftliche Schriften, Band 8). S. 343 – 358.
- Grenzdörffer, G., Foy, T. und Irrgang, A. (2000b): Low Cost Aerial Remote Sensing for Precision Farming.- *EARSEL Dresden*.
- Grenzdörffer, G., Foy, T. und Irrgang, A. (2000c): Remote Sensing for precision agriculture. *Agroenviron 2000. 2nd International Symposium on New Technologies for Environmental Monitoring and Agro-Applications. Proceedings. 18-20 October 2000, Tekirdag / Turkey. Trakya University Publications No 29*, S. 101-110.

Grenzdörffer, G., Korduan, P. und Vatterrott, H.-R. (2000): Entwicklung eines internetbasierten Recherchertools für Fernerkundungsdaten.- In: Tochtermann, K. und Riekert, W.-F. [Hrsg.]: "3. Workshop Hypermedia im Umweltschutz, Ulm 2000" (= Umweltinformatik Aktuell Band 24): S. 253 - 265; Metropolis Verlag.

Korduan, P., Grenzdörffer, G. und Bill, R. (2000): Informationsmanagement und Informationsbeschaffung in der modernen Landwirtschaft.- In: Tagungsband zur 2. Wismarer Wirtschaftsinformatiktage, Cleve, J. [Hrsg.]: S. 282-291.

2001

Ebert, C. und Grenzdörffer, G. (2001): Ertragskartierung – Fehler rechtzeitig erkennen.- Agrarmarkt 7/2001: S. 36 - 39.

Grenzdörffer, G. und Bill, R. (2001): Wie viel Fernerkundung braucht der Landwirt heute und in Zukunft?: In: Bet-tac, H.-D. und Dech, S. [Hrsg.]. 17. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum des DLR, 11. - 13.9. 2000, Neustrelitz: S. 49– 58.

Grenzdörffer, G. und Gebbers, R. (2001): Seven Years of Yield Mapping - Analysis and Possibilities of Multi Year Yield Mapping Data.- In: G. Grenier, S. Blackmoore [ed.] Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture, Montpellier June 18th-21st, 2001, Vol. 1, S. 31 – 36.

Grenzdörffer, G. und Irrgang, I. (2001): Fernerkundung für Precision Agriculture.- Landtechnik **56** 1/2001. S. 53.

Grenzdörffer, G. und Korduan, P. (2001): Informationsmanagement und Konzepte des Precision Farming als Beitrag zur "Gläsernen Produktion" im Pflanzenbau.- Rostocker Agrar- und Umweltwissenschaftliche Beiträge Band 9: S. 243– 252.

Grenzdörffer, G. (2001a): Fernerkundung – vielfältig und flexibel einsetzbar.- Agrarmarkt 5 / 2001: S. 39 – 40.

Grenzdörffer, G. (2001b): Requirements and possibilities of remote sensing for precision agriculture - current status and future developments.- In: G. Grenier, S. Blackmoore [ed.] Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture, Montpellier June 18th-21st, 2001, Vol. 1, S. 211 – 216.

Grenzdörffer, G. (2001c): Operationalisierung der Fernerkundung zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung.- Tagungsband 8 S., Bernburg.

Grenzdörffer, G. (2001d): Geometrisches und radiometrisches Potenzial eines digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystems für Precision Farming (PFIFF).- 21. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF (= DGPF Publikation der DGPF Band 10), S. 123 – 130.

Irrgang, A., Foy, T. und Grenzdörffer, G. (2001): Potential of automated image processing for an operational use of aerial remote sensing in precision agriculture.- In: F. Sévila, G. Grenier, S. Blackmoore [ed.] Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture, Montpellier June 18th-21st, 2001, Vol. 1, S. 223 – 228.

Irrgang, A., Johnen, T. und Gebbers R. (2001): Evaluation of Yield Maps by Low-Cost Remote Sensing. In: F. Sévila, S. Blackmore, G. Grenier (ed.) Precision Agriculture '01.-Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture, Montpellier June 18th-21st, France.

2002

Bill, R., Grenzdörffer, G., Foy, T. und Irrgang, A. (2002): TP Luftbilder.- In: Werner, A. [Hrsg.]: Management für ortsspezifischen Pflanzenbau zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaft und zur Förderung ihrer Umweltleistung / Verbundprojekt *pre agro* - Statusseminar, Bonn 13.-15.3. 2002, 12 S.

Grenzdörffer, G. (2002a): PFIFF - ein flexibles digitales Fernerkundungssystem für Precision Farming.- GIS 3/02 - ZPF-Supplement: S. 30– 35.

Grenzdörffer, G. (2002b): Konzeption, Entwicklung und Erprobung eines digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystems für Precision Farming (PFIFF).- Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C 552.- 140 S.

Grenzdörffer, G. (2002c): Multisensorale Fernerkundung zur Dokumentation der Entwicklung landwirtschaftlicher Pflanzenbestände im Rahmen des Precision Farming.- 22. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Neubrandenburg 24.-26.9.2002 (= DGPF Publikation der DGPF Band 11), S. 355– 362.